

CAPÍTULO 4

Estudio de sistemas DWDM mediante pruebas experimentales para la Delta Metropolitana

Con la finalidad de estudiar los requerimientos necesarios que deberán presentar los equipos DWDM comerciales con el fin de satisfacer las necesidades de la Delta Metropolitana, así como de observar las características principales de cada uno de los elementos que lo componen y estudiar las diferentes características de capa física presentes, este capítulo presenta el conjunto de todas las características principales de dispositivos y propias de un enlace que son necesarias a tomar en cuenta en la elaboración de un enlace DWDM. Se presentan por lo tanto, una serie de resultados prácticos de dispositivos comerciales actuales como transmisores, receptores, multiplexores, demultiplexores y de diferentes aspectos a la transmisión.

Dichos resultados corresponden a mediciones realizadas con equipos WDM de las empresas Optelian, Padtec y NEC.

4.1. Características del transmisor y receptor WDM

Como se presentó en la sección 2.2, el tipo de láseres que son ampliamente utilizados como fuentes monomodo en sistemas WDM son láseres DFB o *Distributed Feedback lasers*. Como se explicó en la sección 2.2, dichos láseres utilizan dentro de la región activa una estructura periódica, o rejilla, que es sensible a la temperatura. Con el fin de satisfacer los grandes requisitos de la tecnología DWDM, los transmisores deben presentar un ancho espectral bastante angosto y potencias de transmisión relativamente altas, ambas que deben presentar una gran estabilidad respecto al tiempo, con el fin de asegurar la correcta transmisión de las señales por la red.

Por lo tanto, esta sección muestra las características espectrales de transmisores DWDM de la empresa Padtec, así como las potencias de transmisión y su estabilidad con respecto al tiempo. Cabe resaltar que las potencias de transmisión y las características espectrales deben cumplir con la Recomendación UIT-T G.698.1.

4.1.1. Características Espectrales del Transmisor

En sistemas DWDM comerciales donde el espaciamiento de canales es bastante pequeño, (hasta 0.4nm), la dependencia de la longitud de onda radiada con la temperatura en láseres DFBs puede llegar a ser dañina, pudiendo ocasionar el traslape de un canal con otro (Inter-channel crosstalk). De lo anterior se hace clara la utilización de un sistema de control de temperatura que sea capaz de mantener la longitud de onda radiada dentro de márgenes especificados, en este caso, por la UIT-T.

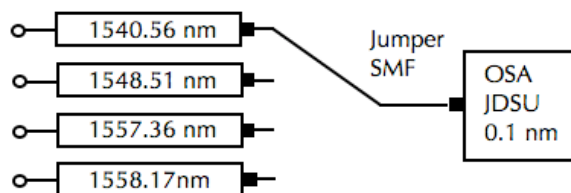


Figura 4.1. Diagrama de conexiones para medición del espectro.

Con el fin de observar la estabilidad de transmisores comerciales, el cuadro 4.1 siguiente muestra las longitudes de onda medidas mediante la configuración de la Figura 4.1 utilizando un analizador de espectro²⁴ (OSA), así como la desviación espectral existente para 4 transmisores DWDM de la empresa Padtec, los cuales se encuentran centrados en las longitudes de onda 1540.56, 1548.51, 1557.36 y 1558.17 nm correspondientes a DWDM de acuerdo a la Recomendación UIT-T G694.1 [1].

**Cuadro 4.1. Desviación espectral para canales
1540.56nm, 1548.51nm, 1557.36nm y 1558.17nm**

Longitud de onda nominal [nm]	Longitud de onda medida [nm]	Desviación [nm]	Desviación máxima permitida [nm]
1540.56	1540.577	0.017	±0.1
1548.51	1548.527	0.017	±0.1
1557.36	1557.451	0.091	±0.1
1558.17	1558.184	0.014	±0.1

La Figura 4.2 muestra la característica espectral de cada uno de los transmisores anteriores medidas mediante un Analizador de Espectro Óptico (OSA) marca JDSU modelo MTS-8000 a una resolución de 0.1 nm.

²⁴ Todas las mediciones realizadas con el OSA tuvieron una resolución de 0.1nm.

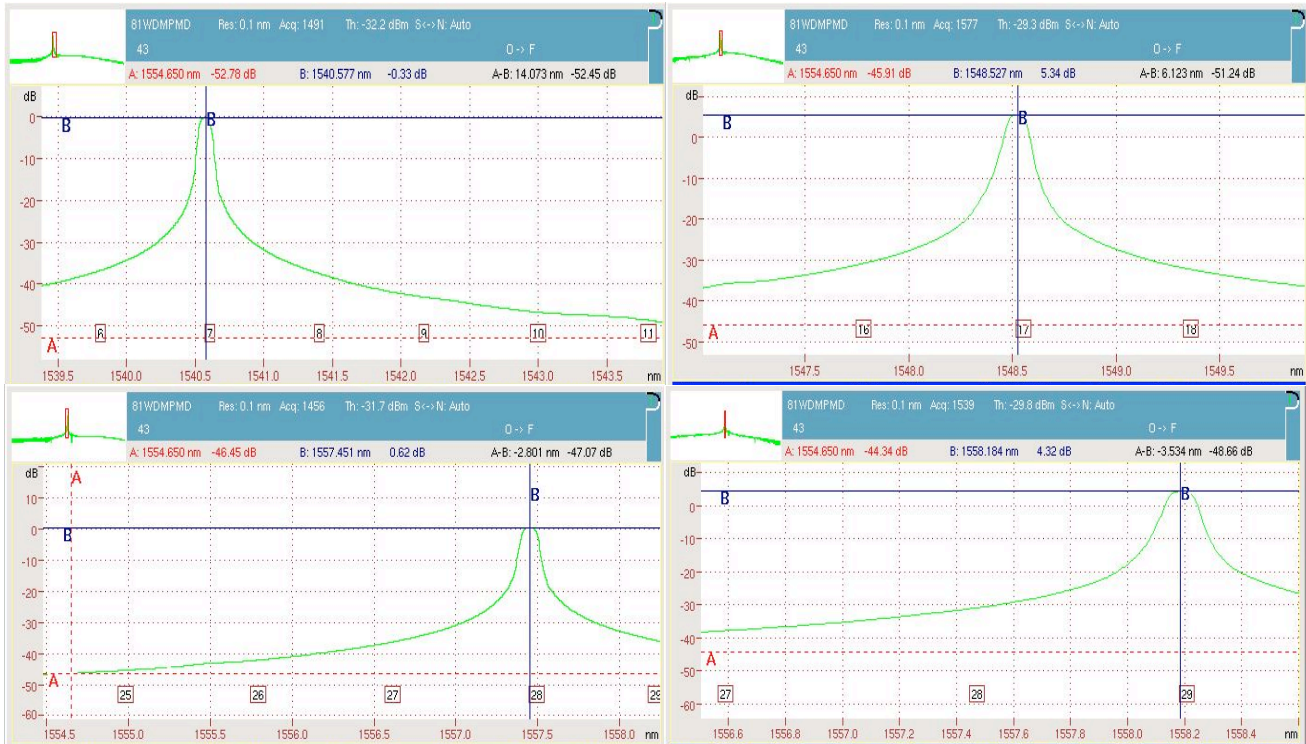


Figura 4.2. Longitudes de onda medidas experimentalmente para 1540.56nm (arriba izquierda), 1548.51nm (arriba derecha), 1557.36nm (abajo izquierda) y 1558.17nm (abajo derecha)

El control de temperatura es realizado mediante un componente interno al encapsulado del láser que permite el control de temperatura absorbiendo o disipando el calor interno, llamado TEC (ThermoElectric Cooler). Si la temperatura del láser asumiera valores fuera del rango especificado para su correcta sintonización, una alarma sería emitida en la tarjeta DWDM correspondiente [2].

Del cuadro 4.1 se puede observar que la desviación espectral para cada uno de los transmisores cae dentro del rango especificado en la Recomendación G.698.1 de la UIT-T [3], mostrada en el cuadro 2.7 de esta tesis.

Los 4 transmisores anteriores corresponden a diferentes tarjetas las cuales se describen a continuación [2].

- Los canales 1540.56 y 1557.36nm corresponden a una tarjeta que convierte una señal óptica multimodo en los rangos de 770 - 860 nm y 1250 - 1650 nm del tipo NRZ, en una señal óptica de salida dentro de la malla DWDM y viceversa. Soporta protocolos de hasta 2.5 Gbps y tiene capacidad de regeneración 3R. En el lado del transmisor utiliza un láser DFB mientras que para el receptor un fotodiodo *p-i-n*.
- El canal de 1548.51 nm corresponde a una tarjeta que tiene la capacidad de multiplexar hasta 8 señales ópticas ESCON, Gigabit Ethernet, FICON (hasta 2 Gbps) y Fiber Channel (hasta 2 Gbps), moduladas en intensidad del tipo NRZ, en una señal OTU-2, la cual modula a una portadora óptica sintonizable dentro de la malla DWDM. Al igual que el caso anterior, utiliza un láser DFB como fuente de luz continua (CW). En el caso del receptor se utiliza un fotodiodo APD.
- Por último, el canal de 1558.17 nm se origina en una tarjeta que realiza la conversión de una señal óptica STM-16, STM-64 y 10 GbE en una señal óptica de 10,7 Gbps a 11,1 Gbps OTN y viceversa, siguiendo la recomendación ITU-T G.709, pudiendo incluir código corrector de error (FEC). La señal OTN modula a una portadora óptica DWDM. Utiliza un fotoreceptor del tipo APD y un láser DFB.

4.1.2. Potencias de Transmisión

Como se observó en el capítulo 3, con el fin de garantizar un enlace de calidad y contrarrestar efectos como las no linealidades, los transmisores ópticos deben cumplir con potencias de transmisión reguladas²⁵. En el caso de estos transmisores, dentro del encapsulado del diodo láser existe un componente que envía una muestra eléctrica de la señal de salida del láser hacia un circuito de control automático de potencia, el cual a su vez controla el nivel de la potencia de salida del láser cambiando la ganancia de corriente de polarización de su circuito eléctrico correspondiente.

Mediante la configuración de la Figura 4.1 pero reemplazando el OSA por un medidor de potencia marca EXFO modelo EPM-100 sintonizado en la ventana de los 1550 nm, el cuadro 4.2 muestra las potencias ópticas de transmisión medidas para los transmisores DWDM antes mencionados.

Cuadro 4.2. Potencia de transmisión para largo alcance.

Canal [nm]	Bit Rate [Gbps]	Potencia emitida [dBm]	Tolerancia [dBm]
1540.56	2.5	0.20	0 - 4
1548.51	10	5.76	3 - 6
1557.36	2.5	0.71	0 - 4
1558.17	10	5.03	3 - 6

En el caso de potencias de transmisión es importante recalcar que éstas son dependientes del tipo de señal que se esté transmitiendo, como por ejemplo STM-16, OTU-1, Gigabit Ethernet, etc. Esto ocasiona que las potencias especificadas por el fabricante para una tarjeta específica puedan no coincidir exactamente con aquellas especificadas en el cuadro 2.7. Sin embargo, dichas potencias deben de ser concordantes para conseguir un adecuado desempeño del enlace.

4.1.3. Estabilidad de longitud de onda radiada y potencia emitida

En general, el rendimiento de un transmisor DWDM radica en gran parte sobre la capacidad de los sistemas de control de temperatura y potencia para poder mantener estables ambas durante largos periodos de tiempo. Aunque láseres DFB aportan buenas características que mejoran considerablemente las prestaciones de un sistema de fibra óptica como: ancho espectral angosto, potencias de transmisión relativamente altas, radiación de un solo modo longitudinal, alto OSNR, etc., si los sistemas de control de temperatura y potencia no son capaces de controlar ambas de una manera eficiente²⁶, entonces los transmisores se vuelven obsoletos.

De esta manera, con el fin de conocer que tan estables se mantienen la longitud de onda emitida y la potencia óptica de transmisión, se presentan en el cuadro 4.3 los resultados obtenidos para un periodo de funcionamiento de los transmisores de 3 horas en intervalos de 1 hora. Las mediciones fueron tomadas mediante el OSA JDSU y el medidor de potencia EXFO siguiendo la configuración de la Figura 4.1.

²⁵ De acuerdo a G.698.1 de la UIT-T.

²⁶ Dentro de rangos específicos.

Cuadro 4.3. Estabilidad de potencia y longitud de onda de los transmisores por un periodo de 3 horas.

	Lambda nominal	1548.51 nm	1558.17 nm	1557.36 nm
Longitud de onda	Tolerancia	0.1 nm	0.1 nm	0.1 nm
	Medida 1	1548.527 nm	1558.184 nm	1557.451 nm
	Medida 2	1548.527 nm	1558.177 nm	1557.449 nm
	Medida 3	1548.524 nm	1558.184 nm	1557.444 nm
Potencia	Tolerancia	3 a 6 dBm	3 a 6 dBm	0 a 4 dBm
	Medida 1	6.03 dBm	5.34 dBm	0.35 dBm
	Medida 2	5.61 dBm	5.45 dBm	0.60 dbm
	Medida 3	5.78 dBm	5.16 dBm	0.60 dBm

Del cuadro 4.3 anterior es clara la gran estabilidad que los sistemas de control le proporcionan al transmisor. La variación de longitud de onda se mantiene por debajo de 0.01 nm para cada uno de los transmisores mientras que la variación de potencia se mantiene por debajo de los 0.5 dBm, estando éstas dentro de los rangos especificados por la UIT-T.

De esta manera, se logra concluir que los transmisores DWDM arriba descritos muestran un alto desempeño, siendo no solo capaces de emitir longitudes de onda con una variación espectral pequeña y potencias de transmisión dentro de los rangos especificados por la UIT-T para transmisiones de larga distancia, sino que también de mantener estables dichas características durante largos periodos de tiempo.

4.1.4. Sensitividad del receptor

Como se presentó en el capítulo 3, los enlaces de la Delta Metropolitana presentan una atenuación aproximada de 25 dB incluyendo las pérdidas ocasionadas por los diferentes elementos del enlace. Esto ocasiona que las características del receptor sean sumamente importantes.

Como se ha visto, los dos tipos de fotorreceptores utilizados hoy en día para comunicaciones por fibra óptica son los fotodiodos *p-i-n* y fotodiodos de avalancha APD. Una de las características principales de dichos elementos es su sensibilidad, cuya ecuación esta dada por²⁷ $P_{rec} = N_p h \nu B$, donde N_p indica el número de fotones por bit para alcanzar un determinado BER. De dicha ecuación se puede observar que la potencia necesaria recibida para un cierto BER por un fotodiodo depende proporcionalmente del bit rate B .

En general, fotorreceptores APD presentan una mayor sensibilidad (menor P_{rec} necesaria) para altas tasas de transmisión que los fotodiodos *p-i-n*. Esto debido principalmente a la ventaja que, debido al efecto avalancha, permite una amplificación de la señal sin necesidad de utilizar amplificadores externos a la entrada del receptor [3], lo que permite en esencia poder manejar valores de N_p más bajos.

En este sentido, con el fin de conocer la sensibilidad de los fotorreceptores correspondientes al equipo DWDM proporcionado por Padtec, se realizó un loop²⁸ en el lado red conectando un VOA (Variable Optical Attenuator) y un BERT (Bit Error Rate Tester) marca JDSU modelo MTS -8000 (Fig. 4.3). Dicha sensibilidad se tomó para un

²⁷ Ver sección 3.2.

²⁸ Conexión del transmisor con el receptor contenidos en el mismo dispositivo mediante una fibra corta.

$BER=10^{-12}$ que es aceptado hoy en día como referencia de desempeño para un sistema de comunicaciones por fibra óptica.

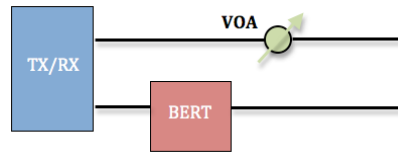


Figura 4.3. Loop realizado para medir la sensibilidad del receptor.

El cuadro 4.4 muestra los valores obtenidos para los canales de 1548.51, 1557.36 y 1558.17 nm.

Cuadro 4.4. Sensibilidad mínima del receptor medida

Canal [nm]	Bit Rate [Gbps]	Tipo	Sensibilidad medida [dBm]	Referencia [dBm] para $BER=10^{-12}$
1548.51	10	APD	-30.60	< -24
1557.36	2.5	p-i-n	-31.82	< -28
1558.17	10	APD	-28.62	< -24

Del cuadro 4.4 anterior se puede observar que los receptores no solo cumplen con la sensibilidad especificada por la UIT-T sino que la exceden.

De dichas pruebas se puede concluir que mediante la utilización de los transponders de Padtec, existiría un margen alrededor de los 10 dB para el canal de 10 Gbps y un margen alrededor de tan solo 5 dB para 2.5 Gbps en el presupuesto de potencia de los enlaces de la Delta Metropolitana. Por lo que los canales de 2.5 Gbps son los limitantes en la distancia de transmisión de los enlaces.

4.2. Multiplexores y Demultiplexores

Como se presentó en la sección 2.6.1, las dos tecnologías de filtros utilizadas para la elaboración de los multiplexores y demultiplexores son :TFF y AWG. Los MUX y DEMUX presentados en esta sección se encuentran implementados mediante ambas tecnologías. Aquellos implementados mediante filtros TFF se caracterizan por su bajo crosstalk y una función de transferencia casi rectangular permitiendo una banda de paso plana. Así mismo presentan una alta estabilidad espectral a variaciones de temperatura, usualmente menos de 0.3 pm / °C en un rango de temperatura de -5 a 70 °C [5].

Las dos principales características que deben presentar dichos elementos son presentar bajas pérdidas por inserción y bajos niveles de crosstalk intercanal. Características que se presentan a continuación para los dispositivos de Padtec, Optelian y NEC.

4.2.1. Pérdidas de Inserción

Las pérdidas de inserción o IL dependen de la tecnología de filtros, del proceso de fabricación de los mismos y del número de canales a multiplexar o demultiplexar.

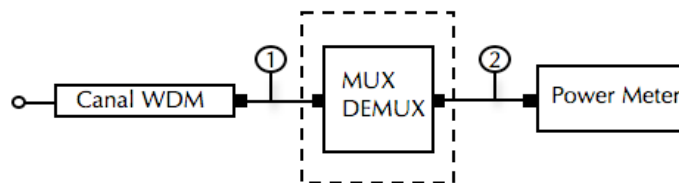


Figura 4.4. Diagrama de conexiones empleado para medir las pérdidas por inserción del dispositivo.

Empleando el diagrama de conexiones de la Figura 4.4., el cuadro 4.5 muestra una comparación de pérdidas de inserción medidas para MUX y DEMUX de las empresas Padtec, Optelian y NEC. Dichas pérdidas se pueden encontrar ingresando un canal al dispositivo y midiendo la potencia óptica a la entrada y salida de éste. Las pérdidas de inserción se pueden encontrar como la diferencia entre las potencia de entrada (P1) y la potencia de salida (P2), expresadas ambas en dBm.

Cuadro 4.5. Medición de las pérdidas de inserción de MUX y DEMUX comerciales

Empresa	WDM	Tecnología	Número de canales	Potencia de entrada [dBm]	Potencia de salida [dBm]	IL [dB]
Padtec	DWDM	TFF	32	6.30	1.70	4.60
Optelian	DWDM	AWG	40	2.8	0.2	2.6
	CWDM	TFF	8	-4	-6	2
NEC	DWDM	AWG	8	1.13	-4.27	5.40
	CWDM	AWG	4	2.91	-2.04	4.95

En general, se puede observar de primera instancia la gran variación que existe entre diferentes fabricantes en cuanto a pérdidas de inserción. En el caso de aquellos MUX y DEMUX implementados mediante tecnología TFF, se puede observar como la disminución de canales ocasiona también la disminución de pérdidas de inserción. En este caso es importante aclarar que entre mayor número de canales a multiplexar o demultiplexar, existirán más pilas reflectivas (una por canal) para la implementación del dispositivo, lo que ocasionará que el primer canal y el

último presenten una diferencia considerable de pérdidas por inserción. Las pérdidas de inserción arriba mostradas corresponden a aquellas al primer canal de cada dispositivo.

Por otro lado, en aquellos implementados mediante AWG existe una gran diferencia de IL. Se puede observar que los AWG correspondientes a NEC presentan pérdidas mucho más grandes que aquellos AWG de Optelian, a pesar de que el número de canales es mucho menor. En este caso, la diferencia radica en la tecnología utilizada para la creación de los mismos y de su calidad.

En general, el estado de arte de los TFF ha logrado que presenten menos pérdidas por inserción que aquellos filtros de tecnología AWG [5].

Las pérdidas por inserción de estos dispositivos es de suma importancia en los enlaces de la Delta. El presupuesto de potencia realizado por el Instituto de Ingeniería considera que el MUX y el DEMUX presentan pérdidas alrededor de los 3 dB. Del cuadro 4.5 se observa que aquellos correspondientes a NEC toman valores de 5 dB para apenas 8 canales. Esto quiere decir que para la implementación de 40 canales se deberían de concatenar varios MUX y DEMUX, lo que aumentaría considerablemente dichas pérdidas. Situación que podría ocasionar que no se cumpla con el presupuesto de potencia necesario.

4.2.2. Interchannel Crosstalk

Además de ser necesarias bajas pérdidas de inserción, también se necesita que el dispositivo sea capaz de seleccionar eficazmente un canal y rechazar los otros. Esto se puede medir tomando el nivel de potencia de los canales adyacentes que interfieren con el canal principal. Entre menor sea esta interferencia se dice que existe un gran aislamiento entre canales o un menor crosstalk.

Si existen altos niveles de crosstalk en el canal deseado, la potencia de los otros canales degradará considerablemente a la señal deseada, deformando la forma de los pulsos transmitidos como se observó en el capítulo 3. Este fenómeno se presenta en mayor medida en sistemas DWDM donde los canales se encuentran mas juntos y por lo tanto los filtros deben ser altamente selectivos.

Con el fin de observar el crosstalk presentado por los multiplexores de las empresas Padtec y Optelian antes estudiados, se multiplexaron los canales 1554.94, 1555.75 y 1556.55 nm para el caso de Padtec y los canales 1530.33 y 1531.12 nm para el caso de Optelian. El crosstalk correspondiente se encontró tomando la diferencia en dB de la potencia pico del canal y la potencia del nivel donde los canales se intersectan.

La Figura 4.5 muestra los canales multiplexados para Padtec y Optelian anteriormente mencionados. Así mismo, el cuadro 4.6 muestra los valores obtenidos. Los resultados se obtuvieron mediante una OSA JDSU MT-8000 para el caso de Padtec y un OSA ADVANTEST Mod. 8381 para el caso de Optelian, ambos a una resolución de 0.1 nm.

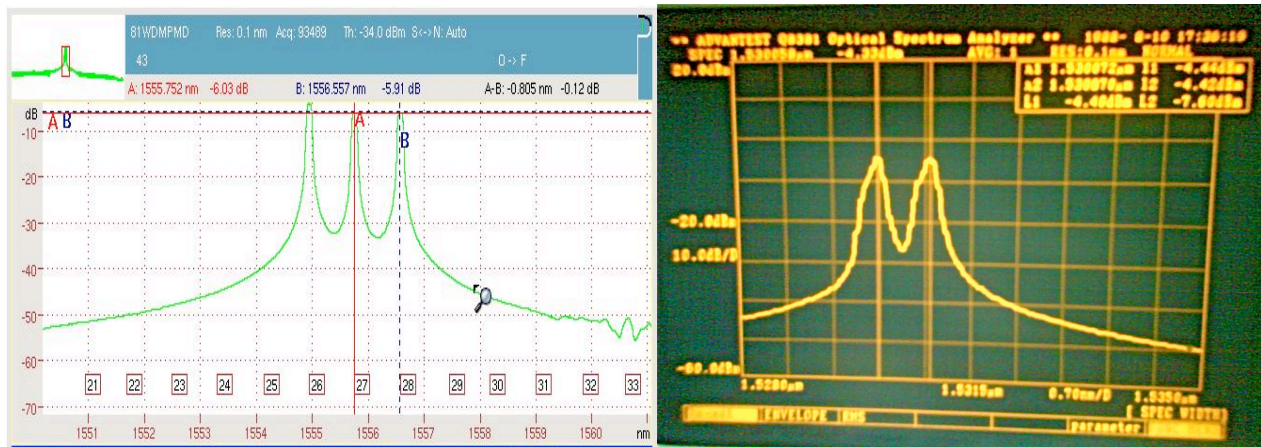


Figura 4.5. Canales 1554.94, 1555.75 y 1556.55 para Padtec (izquierda) y 1530.33 y 1531.12 nm para Optelian (derecha)

Cuadro 4.6 Crosstalk entre canales adyacentes.

	Canal [nm]	Potencia pico del canal [dBm]	Potencia de intersección [dBm]	Interchannel Crosstalk [dB]
Padtec	1554.94	-4.08	-32.48	-28.40
	1555.75	-6.03	-32.48	-26.45
	1556.55	-5.91	-33.72	-27.81
Optelian	1530.33	-4.04	-27	-22.96
	1531.12	-4.04	-27	-22.96

De acuerdo a la Recomendación G.698.1 de la UIT-T, el máximo crosstalk intercanal permitido es de -16 dB para señales con tasas de transmisión de 2.5 y 10 Gbps. De esta manera, cuando cualquier canal esté funcionando a la potencia de salida media mínima en el transmisor y todos los demás canales estén transmitiendo a la potencia media máxima (peor caso), el crosstalk intercanal en el receptor correspondiente deberá ser menor que -16 dB.

Del Cuadro 4.6 se observa que el crosstalk medido es aproximadamente 10 dB menor que aquel especificado por la UIT-T para el caso de Padtec y 7 dB menor para Optelian, esto quiere decir que la interferencia intercanal introducida por ambos MUX es muy baja, mostrando una buena tecnología de filtrado.

4.3. Enlace DWDM

La finalidad de los dispositivos anteriores es el poder transmitir múltiples canales DWDM sobre grandes distancias, conservando bajos niveles de errores en su recepción. Dichos errores son causa de las diferentes características de todos los elementos que constituyen un enlace, como son: el transmisor, el receptor, los MUX y DEMUX, la fibra

óptica, amplificadores, OADM, etc. Entre las consideraciones principales que se deben tomar en cuenta para el rendimiento de un enlace se encuentran: las pérdidas del enlace, el OSNR de recepción, la forma de la señal en la recepción y el BER, mismas que se presentan en esta sección.

La afectación de cada una de éstas fue estudiada teóricamente en el capítulo 3. En esta sección, se presentan utilizando elementos comerciales y un enlace real, los cuales corresponden a aquellos que posiblemente serán utilizados en la implementación de los enlaces del proyecto.

4.3.1. Pérdidas del Enlace

Las pérdidas de un enlace constituyen un parámetro fundamental en la planeación de un enlace WDM. Como se observó en el capítulo 3, la finalidad de conocer la pérdida de potencia de la señal durante su transmisión es la de asegurar que la potencia de llegada al receptor sea mayor a la sensibilidad del mismo. Dichas pérdidas corresponden a aquellas propias de la fibra así como a las IL de cada uno de los dispositivos del enlace.

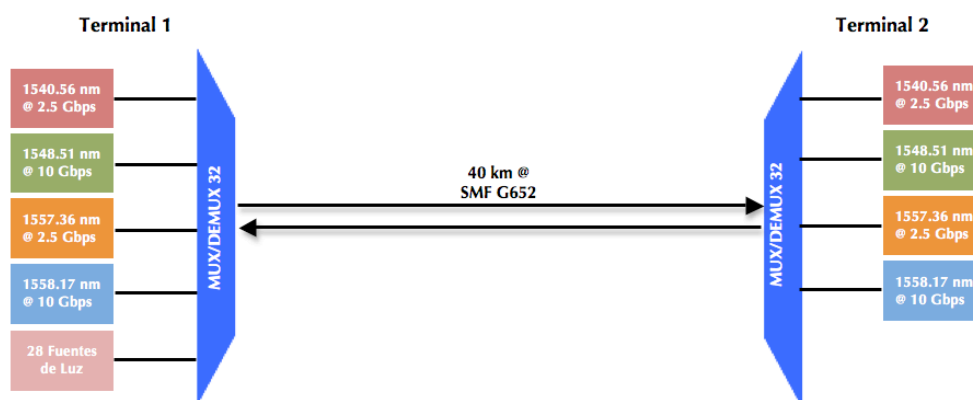


Figura 4.6. Enlace DWDM punto-a-punto.

El escenario mostrado en la Figura 4.6 corresponde a un enlace punto-a-punto DWDM sin elementos intermedios como amplificadores u OADMs. Dicho enlace utiliza los dispositivos de la empresa Padtec descritos con anterioridad, multiplexando 32 canales²⁹ y transmitiéndolos por 40 km de fibra G.652 en un sentido, mientras que en el otro sentido únicamente 4 canales³⁰.

El espectro de ambas transmisiones se muestra en la Figura 4.7 donde los canales se encuentran ecualizados previamente a la entrada del multiplexor con el fin de que todos tengan aproximadamente la misma potencia óptica.

²⁹ Únicamente 4 canales con modulación de datos, los 28 restantes corresponden a fuentes de luz.

³⁰ El enlace consta de 2 fibras G.652 para transmisión unidireccional cada una, utilizando una de estas para transmisión de la Terminal 1 a la Terminal 2 y la otra fibra para la transmisión de la Terminal 2 a la Terminal 1.

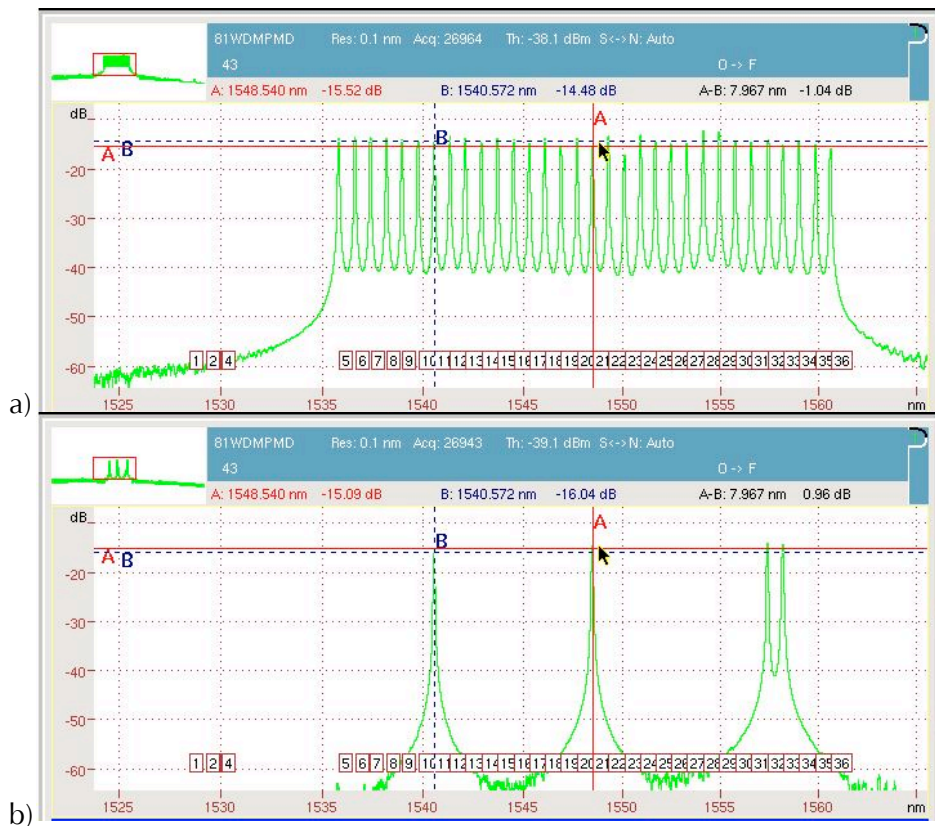


Figura 4.7. Canales DWDM a la salida del multiplexor a) site 1 y b) site 2.

Las pérdidas ocasionadas por la fibra pueden encontrarse obteniendo la diferencia entre la potencia óptica de transmisión (después del multiplexor) y la de recepción (antes del demultiplexor), ambas expresadas en dB. El cuadro 4.7 muestra los resultados obtenidos para las transmisiones de la Terminal 1 a la Terminal 2 y viceversa.

La fibra utilizada fue una fibra ESMF DREKEL tipo G.652 C/D. Dicha fibra presenta un coeficiente de atenuación de 0.21 dB, un coeficiente de dispersión cromática menor a los 18 ps/nm*km, una pendiente de dispersión de 0.090 ps/nm²*km y un diámetro de campo modal de 10.3µm, en la ventana de los 1550 nm.

Cuadro 4.7. Medición de las pérdidas del enlace de 40 km

Transmisión	Potencia de transmisión [dBm]	Potencia de recepción [dBm]	Pérdidas del enlace [dB]
1 → 2	9.43	-1.30	10.73
2 → 1	1.09	-9.18	10.27

Para encontrar la atenuación máxima soportada por el receptor, se colocaron atenuadores a la salida del multiplexor con el fin de reducir la potencia de la señal y, utilizando un BERT MT-800 en el receptor, conocer el BER correspondiente a uno de los canales recibidos. El cuadro 4.8 muestra la atenuación agregada y el BER para cada transmisión.

Cuadro 4.8. Adición de atenuadores de 5 y 7 dB en ambas direcciones.

Atenuación	Potencia de llegada en la Terminal 2	Potencia de llegada en la Terminal 1	BER
5 dB	-6.14	-14.05	Sin Errores
7 dB	-8.60	-15.70	3×10^{-9}

Se puede observar que adicionando 5 dB de atenuación el BER es suficientemente bajo, contándose con una transmisión óptima. Para la fibra DREKEL utilizada, una atenuación de 5 dB equivaldría a aproximadamente 25 km adicionales. Esto quiere decir que se lograrían enlaces de aproximadamente 75 km de longitud considerando únicamente efectos de atenuación. Por otro lado, adicionando un atenuador de 7 dB el BER aumenta considerablemente hasta 3×10^{-9} , valor que no es aceptado para sistemas de fibra óptica actuales.

Es muy importante aclarar que en el caso anterior, los canales fueron ecualizados a la entrada del multiplexor con el fin de que todos tuvieran la misma potencia de salida. La ecualización de canales se utiliza por lo general en sistemas donde se utilizan amplificadores para garantizar que todos los canales se comporten de la misma manera durante su propagación.

En este caso, debido a que la menor potencia presentada por los transmisores corresponde a 0 dBm (para 2.5 Gbps), absolutamente todos los canales se ecualizaron para entrar al multiplexor con esta potencia. Si se toman en cuenta las pérdidas por inserción del mux, los canales están ingresando a la línea con una potencia alrededor de los -5 dBm por canal. Es debido a esto que se presentan errores en la transmisión si se adicionan 7 dB de atenuación extras en el enlace. En el caso de la Delta, la ecualización ocasionaría que los canales de 10 Gbps también presentarían un margen muy pequeño de presupuesto.

La solución más práctica y fácil para corregir este problema radica en la utilización de amplificadores. Aunque existe la limitante de la disminución del OSNR³¹, los amplificadores proporcionan una ganancia adicional a las señales WDM que se transmiten por la fibra.

Un ejemplo claro del uso de amplificadores en un enlace se presenta a continuación, donde se utilizó un amplificador EDFA tipo booster para añadir una ganancia a las señales DWDM mostradas en la Figura 4.7. Dicho escenario se presenta en la Figura 4.8 siguiente.

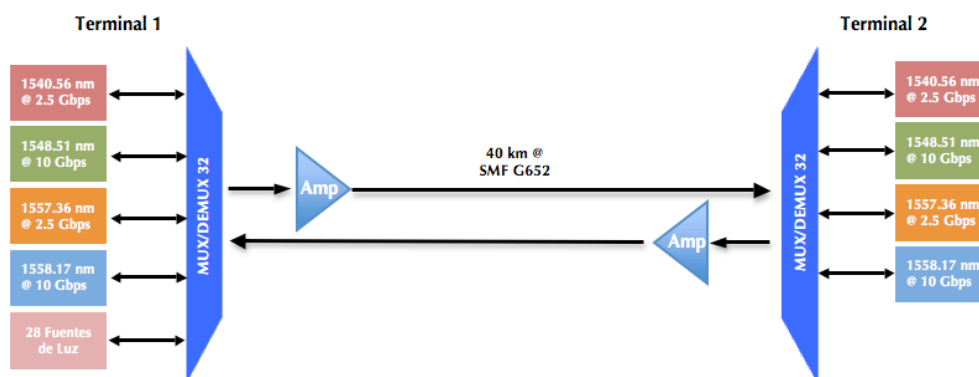


Figura 4.8. Enlace Punto-a-punto con amplificador booster EDFA.

³¹ Ver sección 4.3.2.

El amplificador empleado soporta una potencia máxima de entrada de 5 dBm y una potencia máxima de salida de 21 dB. Con el fin de que el amplificador presente su mínima figura de ruido y una ganancia plana para toda la gama de longitudes de onda soportadas, la potencia de salida total de éste deberá corresponder a la máxima soportada. El sistema se diseña considerando el número total de canales de entrada al amplificador, en este caso 32. Utilizando la expresión 4.1, se puede encontrar la potencia máxima por canal que deberá entrar al amplificador con el fin de no saturarlo.

$$P = P_{ch} + 10 \log N \quad (4.1)$$

Donde N es el número de canales. Por lo que si $P = 5$ dBm y $N = 32$, entonces P_{ch} debe ser -10 dBm. De igual forma, si la potencia máxima de salida debe ser 21 dBm, entonces mediante la expresión 4.1 se puede encontrar que la potencia de salida máxima por canal será de 6 dBm. En este sentido, la ganancia del amplificador se ajustó a 16 dB.

El Cuadro 4.9 muestra los valores de potencia obtenidos en la transmisión y recepción para cada terminal y las pérdidas ocasionadas por el enlace de 40 km.

Cuadro 4.9 Medición de las pérdidas del enlace de 40 km utilizando un amplificador booster EDFA.

Transmisión	Potencia de transmisión [dBm]	Potencia de recepción [dBm]	Pérdidas del enlace [dB]
1 → 2	19.12	9.97	9.15
2 → 1	21.12	9.75	11.37

De dicho cuadro se puede observar que las pérdidas del enlace debido a la fibra G.652 son, obviamente, prácticamente las mismas. La diferencia radica en la posibilidad de adicionar un mayor nivel de atenuación a la señal y no recibir errores en la recepción. El cuadro 4.10 muestra la atenuación agregada y los errores medidos mediante un BERT en el receptor para un solo canal.

Cuadro 4.10. Adición de atenuadores de 17 y 19 dB en ambas direcciones.

Atenuación	Potencia de llegada en la Terminal 2	Potencia de llegada en la Terminal 1	BER
17 dB	-9.36	-8.04	Sin Errores
19 dB	-11.78	-10.34	Hay pérdida del enlace

Se puede observar que mediante el uso del booster es posible tener una ganancia de 17 dB, lo que equivaldría a tener un aumento en la longitud del enlace de aproximadamente 85 km para fibra G.652 estándar, a diferencia de los 25 km adicionales sin el uso de éste. Cabe resaltar que este aumento solo se refiere a la compensación de las pérdidas del enlace.

4.3.2. Relación señal a ruido óptica OSNR

En enlaces ópticos con amplificadores, la relación señal a ruido se ve disminuida cada vez que la señal óptica pasa por un amplificador. Esto se debe a que no solo la señal óptica se amplifica sino también el nivel de ruido, así mismo, cada amplificador adiciona ruido ASE³² al sistema debido a la naturaleza del proceso de amplificación. Esto quiere decir que una señal óptica tendrá mayor OSNR a la entrada del amplificador que a la salida. La relación entre el $OSNR_{IN}$ y el $OSNR_{OUT}$ se conoce como *figura de ruido (NF)* y es un parámetro característico del amplificador [7].

En amplificadores EDFA el ruido ASE ocupa el mismo ancho de banda de amplificación, por lo que se debe poner sumo cuidado en el diseño de enlaces ópticos con amplificadores en cascada con el fin de obtener un OSNR de recepción aceptable para un cierto BER.

La UIT-T en su Recomendación G.697 especifica el método para la medición del OSNR de un canal, el cual se basa en medir la potencia pico de la señal DWDM y la potencia de ruido cuando el canal está desactivado, el OSNR puede ser calculada de la diferencia de estas dos. Utilizando este método, se midió el OSNR del canal 1558.17 nm al final del enlace de 40 km, dicho resultado se muestra en la Figura 4.9.

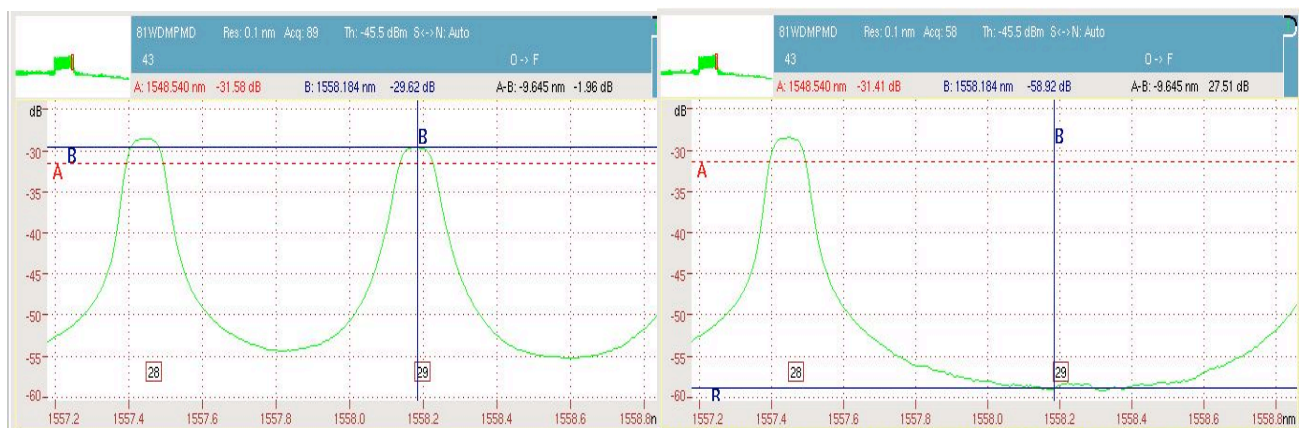


Figura 4.9. Medición de la OSNR de recepción para el canal de 1558.17nm.
Potencia pico del canal (izquierda) y potencia de ruido (derecha)

El cuadro 4.11 muestra el OSNR de los cuatro canales DWDM correspondientes a la empresa Padtec a la entrada del demultiplexor para el enlace de 40 km sin amplificadores.

³² Amplified Spontaneous Emission.

Cuadro 4.11. OSNR de recepción por enlace de 40km.

Canal [nm]	Potencia de Pico en la Recepción [dBm]	Potencia del ruido en la recepción [dBm]	OSNR en la recepción [dB]
1558.17	-28.20	-59.10	30.90
1557.36	-27.38	-58.88	31.50
1548.51	-28.57	-59.51	30.94
1540.56	-27.43	-59.96	32.53

Al no existir elementos en el enlace que adicionen ruido a la transmisión, el OSNR arriba mostrado es el mismo OSNR que los canales tendrían a la salida del multiplexor. Sin embargo como se mencionó anteriormente, el ruido ASE introducido por un amplificador llevaría a la disminución del OSNR dependiendo de la figura de ruido de este.

El cuadro 4.12 muestra el OSNR para el enlace de 40 km con amplificador booster EDFA correspondiente a la Figura 4.8, el cual presenta una ganancia de 16 dB. Es importante aclarar que tanto la ganancia como el ruido ASE son dependientes de la longitud de onda y por lo tanto existen ligeras diferencias para los distintos canales.

Cuadro 4.12. OSNR de recepción por enlace de 40km con amplificador booster EDFA.

Canal [nm]	Potencia de pico en la recepción [dBm]	Potencia del ruido en la recepción [dBm]	OSNR en la recepción [dB]
1558.17	-17.78	-46.84	29.06
1557.36	-16.67	-46.69	30.02
1548.51	-19.31	-49.27	29.96
1540.56	-20.81	-51.02	30.21

Se puede observar que mediante la utilización del EDFA con una ganancia de 16 dB la OSNR se reduce aproximadamente 1 dB. De acuerdo a la Recomendación UIT-T G.698.2, el mínimo OSNR permitido en el receptor con el fin de alcanzar un BER máximo de 10^{-12} para una señal óptica de 2.5 Gbps es de 21 dB, mientras que para una señal a 10 Gbps es de 27 dB. Si el uso de amplificadores ocasionara que el OSNR de recepción cayera por debajo de estos valores sería necesario el uso de regeneradores durante la transmisión.

Cabe resaltar que la baja figura de ruido presentada por el EDFA se debe al bajo nivel de ganancia utilizado. En general el EDFA utilizado permite una ganancia de hasta 34 dB ocasionando una NF de aproximadamente 5.5 dB, siendo ésta normal para amplificadores de este tipo.

El uso de un amplificador booster en los enlaces de la Delta permitiría que no existiera limitación alguna debido a las grandes pérdidas que presentan. Por otro lado, la disminución del OSNR no sería de gran importancia ya que se mantendría por arriba del valor recomendado.

4.3.3. Ganancia de codificación FEC

Sistemas de comunicaciones por fibra óptica modernos utilizan sistemas de corrección de errores con el fin de mejorar considerablemente las prestaciones del sistema, siendo éste más robusto a efectos de atenuación,

dispersión, ruido ASE, efectos no lineales, etc [8] y por lo tanto soportar niveles de OSNR más bajos para un cierto BER .

La codificación FEC (Forward Error Correction) es uno de estos sistemas de corrección de errores en donde el transmisor envía información redundante junto con el mensaje. Esto permite que el receptor sea capaz de detectar y corregir errores³³ sin la necesidad de requerir retransmisión.

Con el fin de observar la ganancia introducida por la utilización de este tipo de sistemas, se tomó la transmisión del canal de 1558.17 nm correspondiente a 10 Gbps y se le adicionó ruido mediante la configuración mostrada en la Figura 4.10.

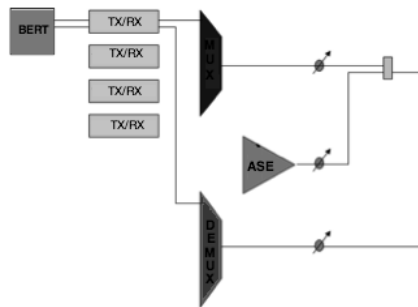


Figura 4.10. Adición de ruido ASE mediante el amplificador EDFA.

En este esquema, se adicionó ruido al sistema mediante el amplificador EDFA y después mediante un atenuador variable, VOA, se aumentó progresivamente la atenuación de la señal. De esta manera se logró disminuir el OSNR del canal de manera controlada y medir mediante un BERT el BER correspondiente asociado a cada OSNR.

El cuadro 4.13 muestra el OSNR de recepción tanto con FEC como sin él, así como la ganancia introducida por su utilización.

Cuadro 4.13. Ganancia por codificación FEC.

BER	OSNR con FEC	OSNR sin FEC	Ganancia del FEC
10^{-6}	13.88 dB	19.68 dB	5.8 dB
10^{-8}	14.55 dB	21.07 dB	6.5 dB
10^{-10}	15.06 dB	21.46 dB	6.4 dB

Como ejemplo del cuadro anterior, mientras un sistema sin FEC necesita una OSNR de 21.46 dB para conseguir un BER de 10^{-10} , uno con FEC necesita únicamente 15.06 dB. Se puede observar que la utilización del FEC aporta una ganancia alrededor de los 6 dB, corrigiendo errores provocados por atenuación, dispersión y efectos no lineales.

El empleo de codificación FEC, permitiría trabajar sin amplificadores en los enlaces de la Delta, incluso cuando los canales fueran ecualizados a la entrada del multiplexor. Por lo general, este tipo de codificación se presenta en

³³ Bajo ciertas limitaciones.

sistemas OTN (Optical Transport Network) donde las señales cliente se encapsulan en una trama OTN similar a como se realiza el encapsulamiento en tramas SDH.

Hoy en día, diferentes compañías proveedoras de equipos WDM realizan sus propios códigos FEC, los cuales se caracterizan por presentar mejores ganancias que códigos FEC tradicionales. Sin embargo, por lo general estos nuevos códigos FEC emplean mayor cantidad de bytes en los encabezados de las tramas OTN, aumentando la tasa de transmisión del sistema.

4.3.4. Medición de la forma de onda de la señal

Con el fin de observar la degradación de la señal debido a la dispersión, atenuación y efectos no lineales, mediante la configuración de la Figura 4.11 se obtuvo el diagrama de ojo a la salida del transmisor de Padtec correspondiente al canal 1548.51 nm mediante un Analizador de Patrón de Ojo marca ANRITSU Mod. MP1026B. Dicha señal corresponde a una tasa de transmisión de 10 Gbps creada mediante modulación externa tipo Mach Zender y se muestra en la Figura 4.12.

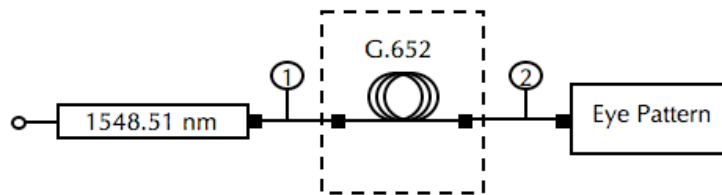


Figura 4.11. Configuración para obtener el patrón de ojo.

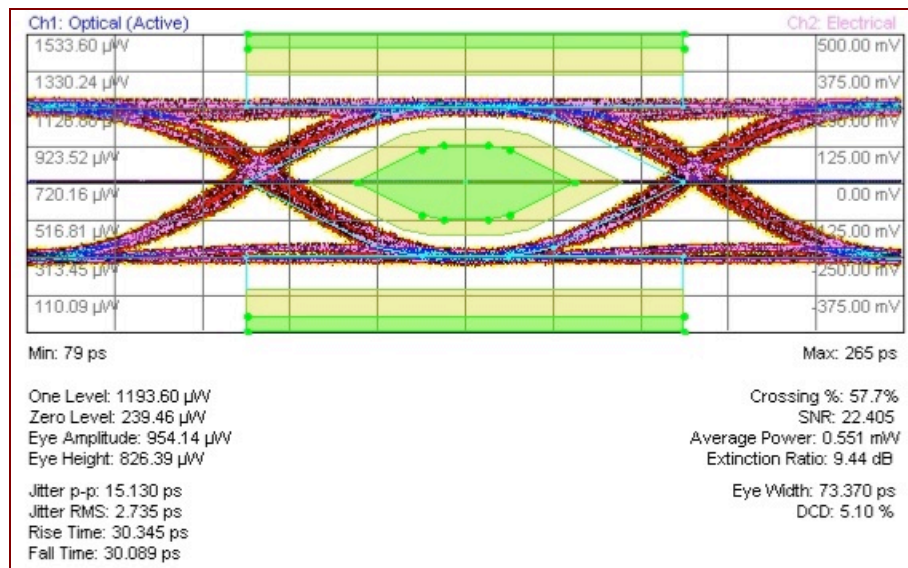


Figura 4.12. Diagrama de ojo para el canal de 1548.51nm a la salida del transmisor.

Como se puede observar, la forma del ojo es muy parecida a aquellas presentadas en el capítulo 3, teniendo una gran apertura del ojo y bajos niveles de jitter. Sin embargo, cuando la señal es transmitida por un enlace de 40 km de fibra³⁴ G.652, como se muestra en la Figura 4.13, se pueden presenciar claramente los efectos de la dispersión y atenuación de la señal.

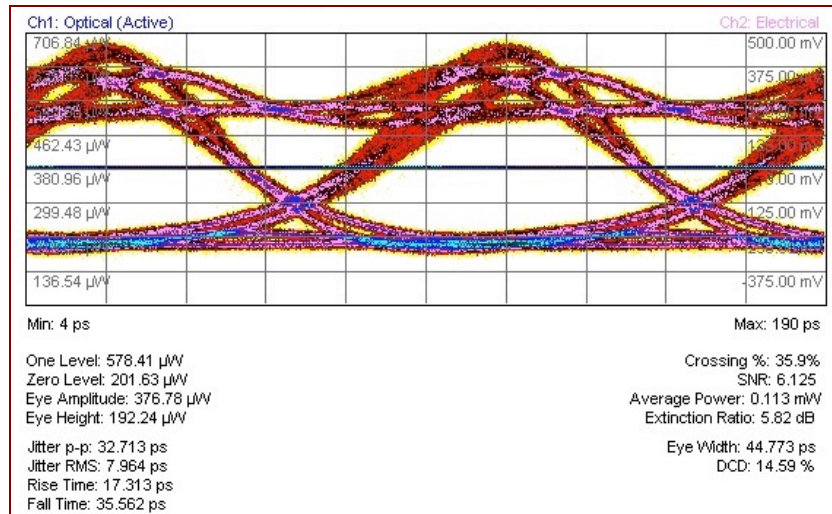


Figura 4.13. Diagrama de ojo para el canal de 1548.51nm al final del enlace de 40km.

Observando el diagrama de ojo anterior, se puede visualizar la clara degradación del patrón a medida que aumenta la atenuación y dispersión de la señal. Estos factores ocasionan que el ojo se cierre a medida que se propaga por la fibra (el eye width se reduce notablemente y hay degradación del extinction ratio), debido a la reducción de potencia y al aumento del jitter ocasionado por el ensanchamiento del pulso. El jitter corresponde básicamente a una desviación de fase respecto de la posición ideal en el tiempo de una señal digital que se propaga en un canal de transmisión. Es ocasionado principalmente por el ensanchamiento del pulso, provocando interferencia entre símbolos.

Técnicamente, las máscaras preestablecidas (Fig 4.12) definen regiones específicas en el diagrama de ojo dentro de las cuales las trazas que forman los pulsos no deben introducirse. Dichas máscaras son muy útiles ya que se utilizan en el diseño de canales de transmisión, especificando por medio de ellas zonas no permitidas para las señales. Con ello se logra preestablecer un diseño óptimo de enlaces que cumplan ciertas características, ya que si la señal digital que se propaga por el canal se introduce en dichas regiones, se observarían claramente problemas y errores en la transmisión [9].

Mediante las ecuaciones (2.18) y (2.19) se encontró el valor de Q y el BER correspondiente a la transmisión. Donde I_0 es el nivel de potencia medio para un bit 0 e I_1 para un bit 1, σ_0 la desviación estándar correspondiente al nivel de potencia para un bit 0 y σ_1 la correspondiente para un bit 1. La Figura 4.14 muestra los valores obtenidos para la media y desviación estándar de los correspondientes bits para cada uno de los puntos de medición.

³⁴ Sin ningún elemento de red como multiplexores, demultiplexores, amplificadores, etc.

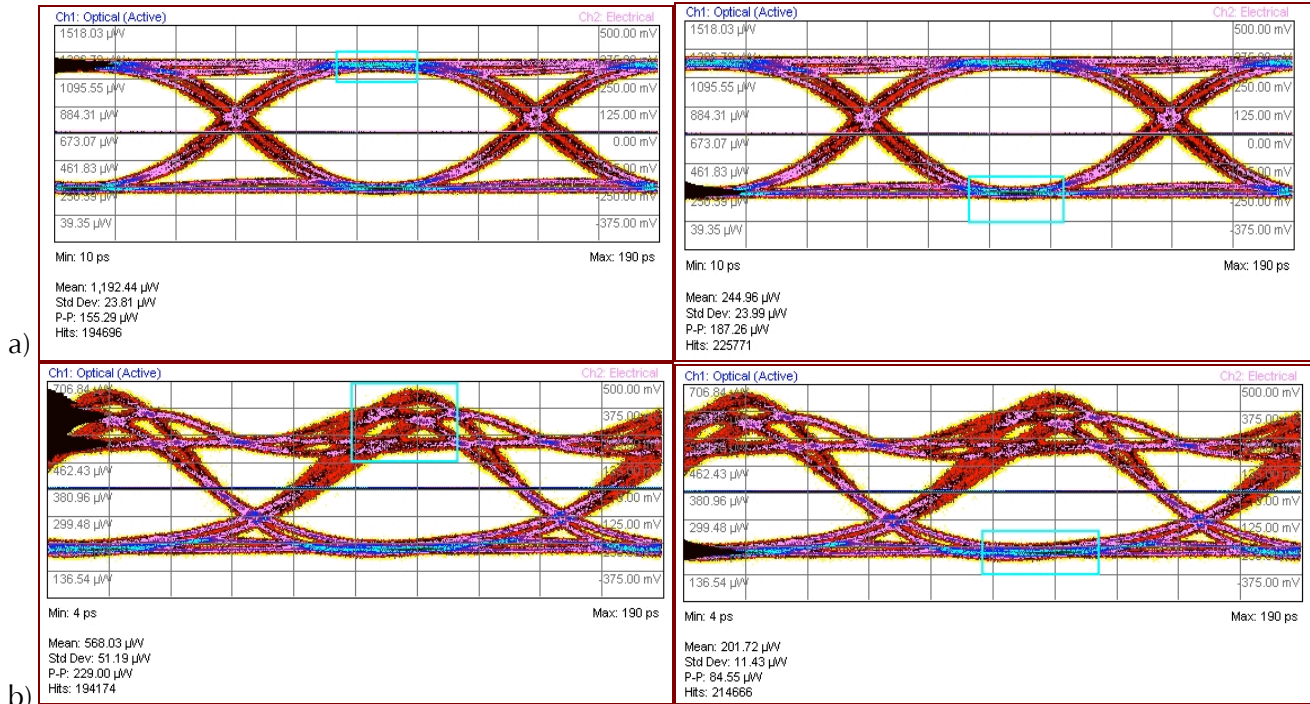


Figura 4.14. Medición de la media y desviación estándar para bits 1 y 0 a) a la salida del transmisor y b) al final del enlace de 40km.

El cuadro 4.14 muestra el factor de calidad y el BER correspondiente a cada punto de medición mediante el uso de las ecuaciones (2.18) y (2.19).

Cuadro 4.14 Valor Q y BER para 0 y 40km de transmisión.

Distancia [km]	Q	BER
0	19.82	1×10^{-87}
40	5.85	2.52×10^{-09}

El BER de 2.52×10^{-09} observado después de 40 km de transmisión resulta ser demasiado alto en comparación con la referencia de 10^{-12} necesario hoy en día para tener un enlace de buena calidad. Si se observa la sección 4.1.6 se puede observar que utilizando un BERT, el BER de 3×10^{-09} se alcanza añadiendo 7 dB de atenuación después de una transmisión por 40 km. Esto muestra claramente una discrepancia del cálculo del BER mediante la ecuación 2.18 y el obtenido mediante el BERT.

Esta discrepancia radica en que la ecuación (2.18) asume una serie de características en la distribución de la señal, como el hecho de que la distribución debe ser Gaussiana, situación que claramente no se presenta en la Figura 4.12. Por lo tanto, el BER tomado como correcto es aquel proporcionado por el BERT y no el obtenido mediante la ecuación (2.18). Aun así, el uso de la aproximación 2.18 es útil, sobretodo en medidas realizadas en campo, en que usualmente no se dispone de un BERT.

Como se presentó en el capítulo 3, los enlaces de la Delta presentarán un gran número de empalmes y se utilizarán

DFOs en diferentes puntos. Con el fin de observar como se afectará la forma de la señal, esta situación se simuló utilizando un enlace de 6 km de fibra G.652 dentro de las instalaciones de Ciudad Universitaria, el cual presenta un gran número de conectores, DFOs y empalmes. La Figura 4.15 muestra la caracterización de la fibra mediante un OTDR JDSU MT-8000.

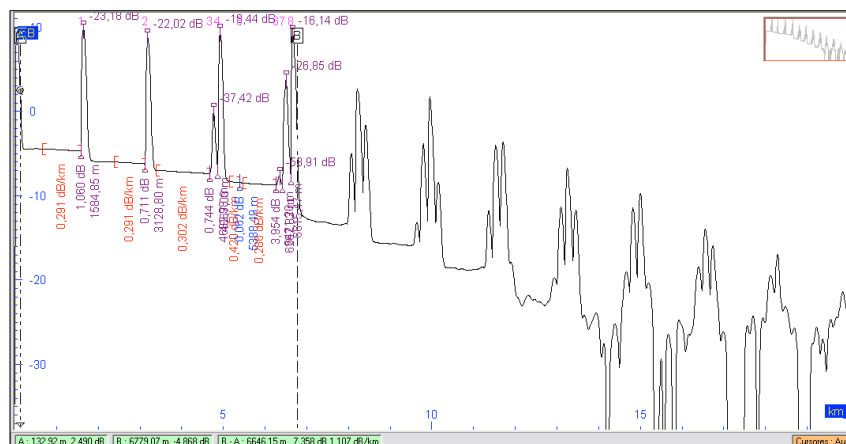


Figura 4.15. Análisis de OTDR sobre el enlace.

De primera instancia se puede observar la gran atenuación existente a pesar de la distancia que representa. Dicha distancia es aproximadamente de 6.6 km con una atenuación total de 7.35 dB, esto equivale a prácticamente 1.11 dB/km. En segundo lugar se observa la gran cantidad de reflectancia en el enlace debidas a múltiples conectores en él. El cuadro 4.15 muestra los valores obtenidos mediante el OTDR.

Cuadro 4.15. Eventos registrados mediante el OTDR sobre la fibra de la UNAM.

Fallo	Tipo de Fallo	Distancia de Fallo (m)	Pérdidas (dB)
1	Reflectancia	1584.85	0.463
2	Reflectancia	3128.80	1.964
3	Reflectancia	4682.98	3.148
4	Reflectancia	4867.03	3.203
5	Empalme	5388.49	4.184
6	Reflectancia	6267.83	4.493
7	Reflectancia	6421.20	4.537
8	Fin de fibra	6615.47	4.593

Por lo tanto, una señal que fuera transmitida por un enlace de estas características sufriría en principio una mayor distorsión.

En este caso, se utilizó un transmisor de la empresa NEC el cual transmite una señal GbE³⁵ mediante modulación directa del láser. El patrón de ojo obtenido mediante el analizador ANRITSU se presenta en la Figura 4.16.

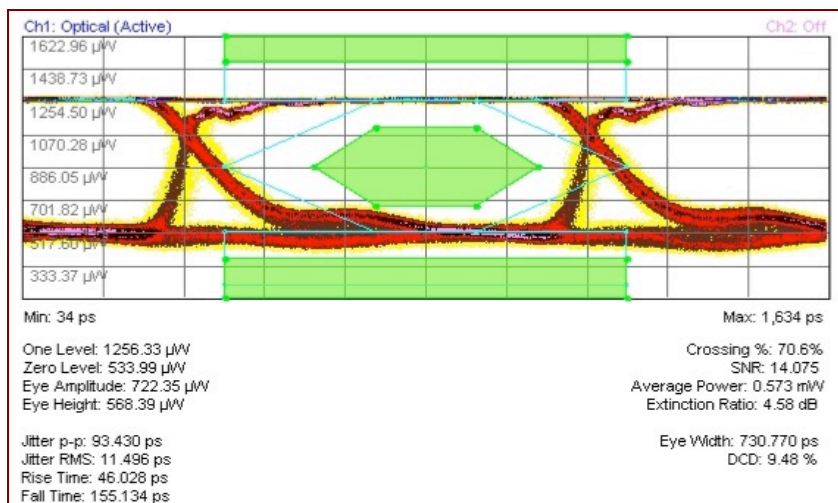


Figura 4.16. Diagrama de ojo a la salida del transmisor a 1.25Gbps.

De dicho diagrama se puede observar claramente la presencia de oscilaciones de relajación del láser debido a este tipo de modulación, haciéndolo del tipo transitorio. De esto se puede deducir la posible existencia de chirp transitorio en la señal. En general, el chirp se puede descomponer en dos componentes: chirp transitorio y chirp adiabático. El chirp transitorio ocurre durante los flancos de subida y de bajada de los pulsos, es decir, es proporcional a las variaciones temporales de la potencia óptica y es asociado a las oscilaciones de relajación del láser. Por el contrario, el chirp adiabático depende del nivel de señal y se manifiesta como un desplazamiento frecuencial de la portadora entre los niveles bajo y alto del pulso [10,11].

Como se presentó en la sección 3.1, la presencia del chirp limita considerablemente la distancia máxima de transmisión debido a su contribución sobre el ensanchamiento del pulso. Esta limitación se da más sobre señales a tasas de transmisión por arriba de los 10 Gbps.

Para observar la degradación provocada por el enlace, se ingresó dicho canal correspondiente a la Figura 4.13 al enlace de la UNAM y mediante la configuración de la Figura 4.11 se obtuvo el diagrama de ojo a la salida de la fibra (Fig. 4. 17).

³⁵ Giga bit Ethernet operando a 1.25 Gbps.

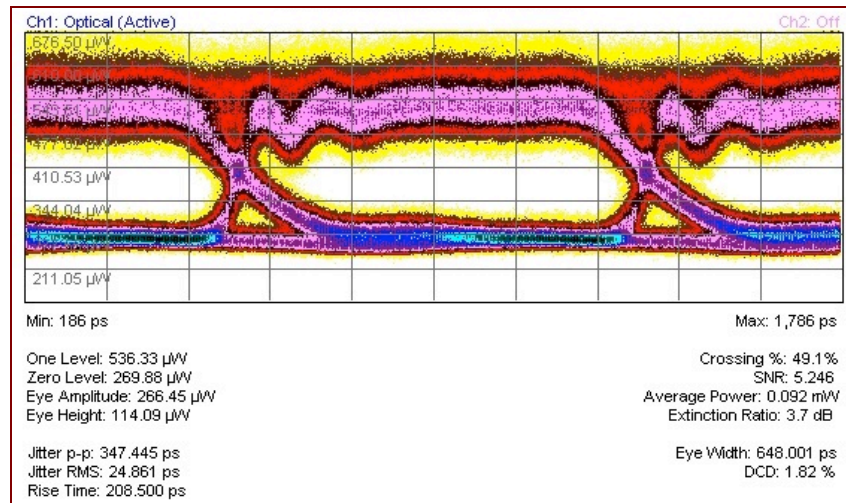


Figura 4.17. Diagrama de ojo a la llegada al receptor.

De dicho patrón se puede observar claramente la disminución de la apertura del ojo debido a las múltiples reflexiones existentes, esto se traduce a un ensanchamiento del nivel alto del pulso provocado por interferencia con la señal reflejada. Así mismo, se puede observar que la señal no sufre una mayor distorsión por dispersión debido a la corta longitud del enlace.

Al igual que el cuadro 4.15, el cuadro 4.16 muestra el BER obtenido mediante las ecuaciones (2.18) y (2.19) donde se observa el gran aumento del BER en tan solo 6.6km de fibra. Cabe resaltar que la forma de onda presentada en estos diagramas se encuentra muy lejos de tener una forma Gaussiana y por lo tanto dichas ecuaciones ya no presentan resultados exactos para el cálculo del BER.

Cuadro 4.16 Valor Q y BER para 0 y 6 km de transmisión.

Distancia [km]	Q	BER
0	18.23	1.49×10^{-74}
6	5.47	2.32×10^{-08}

En conclusión, el diagrama de ojo es una técnica bastante útil para caracterizar un enlace por fibra óptica, sin embargo el cálculo de BER a partir de éste no es exacto y solo sirve como referencia. Esto se debe a que equipos comerciales no utilizan exactamente pulsos con características totalmente Gaussianas. Por lo que para caracterizar un enlace de manera eficaz se debe utilizar un BERT.

Por otro lado, se estudiaron dos tipos de modulación de láseres para comunicaciones, modulación externa y directa. La modulación externa se utiliza en láseres que trabajan a tasas de transmisión de 10 Gbps o mayores, mientras que láseres modulados directamente se utilizan para tasas por debajo de los 10 Gbps. Esto se debe a la presencia de chirp en estos últimos, lo que limita la distancia de transmisión considerablemente debido al ensanchamiento del pulso. Esto se puede visualizar a partir de la ecuación (3.6), (3.7) y (3.8).

Además, se ve la clara necesidad de contar con enlaces de calidad que añadan la menor cantidad de distorsión a la

señal, permitiendo así su transmisión por grandes longitudes de fibra con bajos niveles de BER. Los empalmes que se realicen en los enlaces deberán ser empalmes por fusión que presenten bajos niveles de reflexión con el fin de evitar los efectos de la Figura 4.17.

4.4. Inserción y derivación de canales mediante OADMs

La utilización de OADM en enlaces en anillo permiten implementar esquemas de protección de ruta de manera similar a como se implementan en anillos SDH. Esto daría la posibilidad de implementar esquemas de protección en los enlaces de la Delta. Con el fin de analizar la inserción y derivación de canales utilizando estos dispositivos, se utilizó un OADM de la empresa Padtec, el cual consiste en una sola tarjeta que utiliza internamente un multiplexor y un demultiplexor. Los canales que permite subir o bajar son fijos.

Los OADMs de las empresas Optelion y NEC se crean mediante la configuración de los transpondedores y multiplexores, por lo que su análisis no se presenta.

La Figura 4.18 muestra la configuración utilizada para insertar el canal de 1510 nm y bajar el canal de 1558.17 nm.

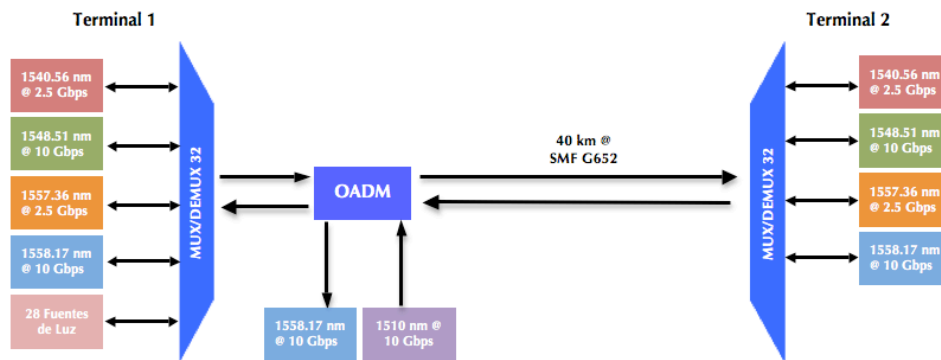


Figura 4.18. Enlace WDM con OADM.

Debido al hecho de que un OADM es prácticamente un multiplexor y un demultiplexor, existe la necesidad de conocer sus pérdidas de inserción. Sin embargo, suele ser un poco más complejo debido al mayor número de combinaciones posibles de ingresar canales y extraer canales del dispositivo.

La Figura 4.19 muestra la configuración del OADM proporcionado por Padtec con sus respectivos puertos de entrada (In, Add) y salida (Out, Drop).

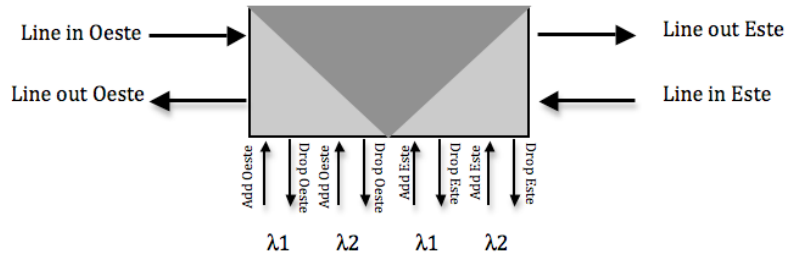


Figura 4.19. Configuración del OADM para dos canales.

Con el fin de conocer sus pérdidas de inserción, se ingresó el canal centrado en 1558.17 nm por diferentes puertos como se describe a continuación. En primer lugar se insertó el canal de 1558.17 nm (correspondiente a λ_1) por el puerto Line In Oeste y se midió la potencia en los puertos Drop Oeste y Line Out Este. Posteriormente se ingresó por el puerto Line In Este y se midió la potencia en los puertos Drop Este y Line Out Oeste. Finalmente se ingresó el canal por el puerto Add Este y se midió la potencia en el puerto Line Out Oeste. Se insertó el canal por el puerto Add Oeste y se midió la potencia en el puerto Line Out Este.

Mediante esta configuración se logró medir las IL de cada uno de los puertos del OADM. Debido a que se encuentra implementado con tecnología TFF y se manejan un pequeño número de canales, las pérdidas de inserción son bajas como lo muestra el Cuadro 4.17 siguiente.

Cuadro 4.17. Pérdidas por Inserción del OADM.

Medida	Potencia de entrada [dBm]	Potencia de salida [dBm]	Pérdida de inserción [dB]
Canal de Paso Oeste para Este	6.35	5.11	1.24
Drop Oeste	6.36	5.10	1.26
Add Oeste	6.25	5.41	0.84
Canal de Paso Este para Oeste	6.33	5.40	0.97
Drop Este	6.22	5.24	0.98
Add Este	6.24	4.90	1.34

El objetivo final del OADM se puede observar en las siguientes Figuras (4.20 y 4.21) donde el OADM añade un canal centrado en 1510 nm a las transmisiones correspondientes a la Figura 4.7 y extrae el canal de 1558.17 nm de la transmisión de la Terminal 2 a 1.

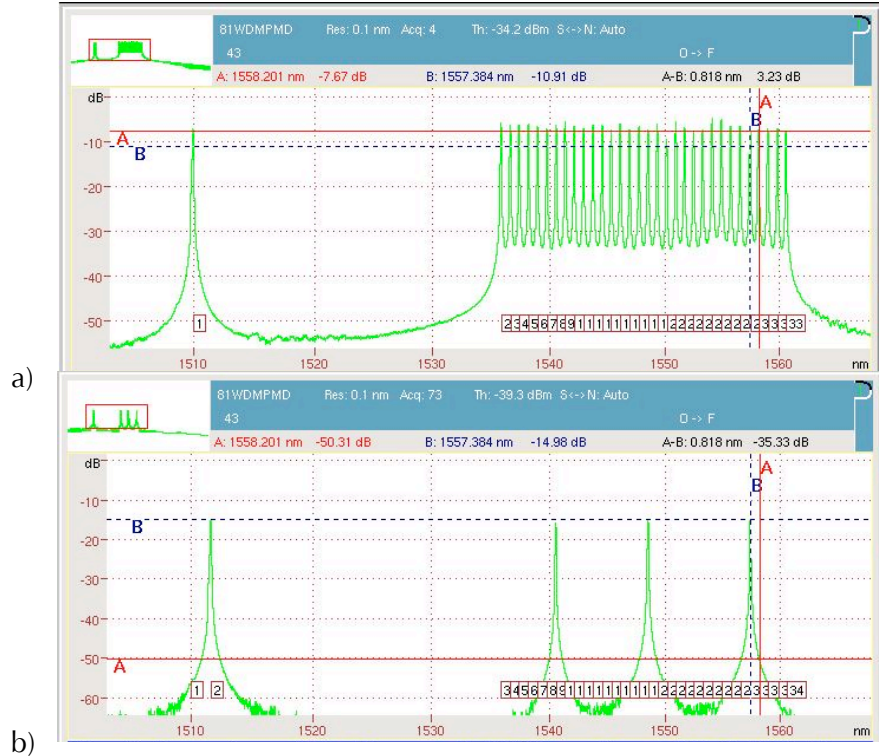


Figura 4.20. Inserción del canal 1510nm a las transmisiones de a) la Terminal 1 a la 2 y de b) la Terminal 2 a la 1.

Nótese que el canal de 1510 nm al estar fuera del espectro DWDM soportado por los equipos presenta una mayor tolerancia de desviación espectral.



Figura 4.21. Canal de 1558.17nm después de ser bajado mediante el OADM.

En este caso, el canal de 1510 nm se encuentra fuera del espectro DWDM pero puede ser utilizado como canal de supervisión. La funcionalidad del canal óptico de administración o supervisión es la capacidad de acceder y controlar terminales remotas con el fin de verificar o modificar distintos parámetros de los equipos.

De esta manera, se logra presentar la capacidad de un OADM en subir o bajar canales de un enlace WDM, permitiendo implementar una topología de red en principio un poco más compleja, como el anillo, de una manera práctica y costeable, presentando bajas pérdidas de inserción a comparación de aquellas propias de multiplexores y demultiplexores.

4.5. Conclusiones

En este capítulo se analizaron diferentes características de equipos comerciales correspondientes a las empresas Padtec, Optelian y NEC. Las características presentadas correspondieron a aquellas que se deben de tomar en cuenta para la implementación de la capa física de la Delta Metropolitana. En particular se puede concluir que:

- La potencia de transmisión de los láseres es de suma importancia para el cálculo del presupuesto de potencia de los enlaces. En este caso, los transmisores de 10 Gbps emiten una potencia de 5 dBm mientras que los de 2.5 Gbps emiten aproximadamente 0.5 dBm. Siguiendo la Recomendación de la UIT-T G.698.1, los transmisores a 2.5 Gbps emiten en un rango de 0 a 4 dBm. En el caso de la Delta, una potencia de transmisión de 0 dBm limita considerablemente el presupuesto de potencia, dejando menos de 5 dB de tolerancia. Esta situación puede limitar considerablemente el rendimiento del sistema.
- La sensibilidad de los receptores resultó alrededor de los -29 dB, independientemente de la tasa de transmisión. Esto es posible gracias a la utilización de fotodiodos APD para tasas de transmisión de 10 Gbps. Esto aporta la ventaja principal de soportar una mayor atenuación de la señal. Sin embargo, debido a la alta atenuación que presentarán los enlaces (≈ 25 dB), el presupuesto de potencia queda muy ajustado como se menciono en el punto anterior.
- Las pérdidas de los multiplexores y demultiplexores es dependiente de la tecnología de filtros empleada y del número de canales. Los multiplexores que se utilicen para la Delta deberán presentar pérdidas por inserción menores a lo 5 dB, de otra manera el presupuesto de potencia quedaría más ajustado y sería necesaria la utilización de amplificadores en los enlaces.
- La utilización de un amplificador tipo booster eliminaría la limitante de las pérdidas del enlace, resultando en una ganancia de 17 dB. La disminución del OSNR debido a su utilización no resultaría en ningún problema para el rendimiento de los enlaces. Para su utilización, se deberá ajustar la potencia de entrada al mismo y la ganancia de acuerdo al número de canales a utilizar. Es recomendable que desde un principio se ajuste al mayor número de canales soportados para evitar reconfigurarlo conforme se añadan más canales al sistema.
- La utilización de codificación FEC, resultaría en una ganancia de aproximadamente 6 dB, lo que garantizaría el correcto funcionamiento del sistema sin la necesidad de utilizar amplificadores.
- Los empalmes que se realicen en los enlaces deberán presentar baja reflectividad, así como las conexiones a DFOs deberán estar sumamente limpias para evitar los efectos que se presentan en la Figuras 4.15 y 4.17.

Referencias

- [1] ITU-T Recommendation G.694.1, *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*, June 2002.
- [2] Padtec, LightPad i1600G Sistema de Transmisión Multiservicio DWDM 160 canales. Manual Técnico.
- [3] ITU-T Recommendation G.698.1, *Multichannel DWDM applications with single channel optical interfaces*, December 2006.
- [4] Ramón Gutiérrez Castrejón, *Hacia un sistema de comunicaciones totalmente óptico*. Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, Mayo 2005.
- [5] X.X. Zhang, *Thin film optical filter – an enabling technology for modern optical communication systems*, *Proceedings of the SPIE, Volume 5595*, pp. 349-358, October 2004.
- [6] Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón, *Apuntes de clase: Redes Ópticas y de Microondas*, UNAM, 2009.
- [7] Cisco Systems, *Introduction to DWDM for Metropolitan Networks*, Cisco Systems, Corporate Headquarters, 2000, <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=30886>
- [8] Guozhou Jiang and Deming Liu, *Analysis and implementation of FEC in 10G-EPON*, *Frontiers of Optoelectronics in China*, Volume 2, Number 4 / December, 2009, pp.384-388.
- [9] José Antonio Dinamarca Ossa, "Teoría de Comunicaciones Digitales", Universidad Técnica Federico Santa María, Rol. 9721036-5 06.11.2002.
- [10] Avi Zadok, Hamutal Shalom, Moshe Tur, W. D. Cornwell, and Ivan Andonovic, *Spectral Shift and Broadening of DFB Lasers Under Direct Modulation*, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10, No. 12, December 1998.
- [11] M.Zamorano, E. Moschim, S. Rossi, *Análisis del efecto del chirp sobre el desempeño de un sistema óptico*, *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Tarapaca, Chile*, Vol. 7, pp. 29-34.
- [12] Jose Campany Franco y Beatriz Ortega Tamarit, *Redes ópticas*, Ed. Universidad Politécnica de Valencia