



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LOS AMPLIFICADORES EDFA Y RAMAN
TIPO “ÓPTICO-ÓPTICO” EN DWDM**

Maicol Armando Galdámez González
Asesorado por el Ing. Juan David Alvarado Corado

Guatemala, agosto de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LOS AMPLIFICADORES EDFA Y RAMAN
TIPO “ÓPTICO-ÓPTICO” EN DWDM**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTA DE INGENIERÍA

POR

MAICOL ARMANDO GALDAMEZ GONZALEZ
ASESORADO POR EL ING. JUAN DAVID ALVARADO CORADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Durán Córdova
EXAMINADOR	Ing. José Aníbal Silva de los Ángeles
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LOS AMPLIFICADORES EDFA Y RAMAN TIPO "ÓPTICO-ÓPTICO" EN DWDM,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica Eléctrica, con fecha 13 de julio de 2007.



Maicol Armando Galdámez González

Guatemala, 26 de Mayo de 2009

Ingeniero
Julio César Solares Peñate
Coordinador Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Estimado Ingeniero:

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado **Criterios de Selección para los amplificadores EDFA y Raman tipo "óptico-óptico" en DWDM**, elaborado por el estudiante Maicol Armando Galdámez González.

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobación, e indicarle que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Atentamente,



Ing. Juan David Alvarado Corado
Ingeniero electrónico
Colegiado # 5593
ASESOR
Juan David Alvarado Corado
Ingeniero Electrónico
Colegiado 5593



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica y Regional de Post-grado de Ingeniería Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 13 de julio de 2009

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **“CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LOS AMPLIFICADORES EDFA Y RAMAN TIPO “ÓPTICO-ÓPTICO” EN DWDM”**, desarrollado por el estudiante **Maicol Armando Galdámez González**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

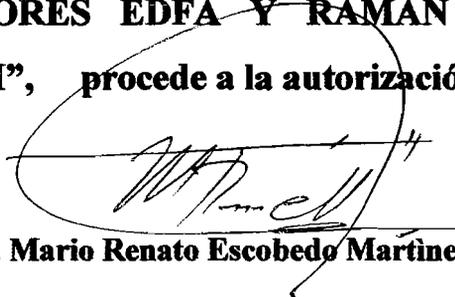

Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica





REF. EIME 40.2009.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Maicol Armando Galdámez González titulado: "CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LOS AMPLIFICADORES EDFA Y RAMAN TIPO "ÓPTICO-ÓPTICO" EN DWDM", procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

GUATEMALA, 22 DE JULIO 2,009.





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA LOS AMPLIFICADORES EDFA Y RAMAN TIPO "ÓPTICO-ÓPTICO" EN DWDM**, presentado por el estudiante universitario **Maicol Armando Galdámez González**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, handwritten signature in black ink, appearing to read 'Murphy Olimpo Paiz Recinos', written over a large, empty oval shape.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, agosto de 2009



/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS Y A LA VIRGEN MARIA

Por permitirme vivir y darme el entendimiento necesario para llegar hasta el final de este trabajo de graduación, la cual es una de mis metas en la vida. Gracias, por darme la sabiduría de ir por el camino correcto y para hacer las cosas correctas, porque no lo hubiese logrado si no fuera por su bendición.

MIS PADRES

Manuel Galdámez y Judith González de Galdámez, quienes me han brindado su apoyo y amor incondicional para que pueda alcanzar mis metas. Razón por la cual le pido a Dios para que el esfuerzo que ellos han realizado sea recompensado.

MI AMADA

Ana Judith Morales M., por tu amor, comprensión, apoyo y confianza que me has brindado durante todo este tiempo desde que gané mi primer curso hasta este gran momento en mi vida. Te amo mi vida linda.

MIS HERMANAS

Stefani, por tenerme tanta paciencia durante mis años en la universidad y a Jennifer, aunque este pequeña y no entienda estas cosas.

DON MACO

Por darme buenos consejos y apoyarme en todo lo que yo necesite en la etapa mas difícil de mi vida. Lo estimo mucho como persona de bien que es.

MI TÍO

Carlos Enrique González Alonzo (q.e.p.d.), por ser tan bueno conmigo.

MIS ABUELOS

Enrique González (q.e.p.d.) y Mardoqueo Galdámez (q.e.p.d.), por formar parte de mi niñez tan especial para mí.

MIS AMIGOS	Diego Arriola, Rudy Franco, Vinicio Gómez, Luis García, Luis Barahona y los demás de la foto, a pesar de los años que han pasado desde la graduación del colegio seguimos con nuestra amistad, en especial a Diego que aún me siento en deuda con él.
MIS COMPAÑEROS	Luis Marin, Luis Madriles, y al resto que cerramos en el mismo año por haber formado un grupo unido y perseverante.
DEMÁS AMIGOS	Ruth Franco y Mario Chávez, por darme consejos en el trabajo y en la vida, en especial a Ruth ya que ella siempre me aconsejo y confió en mí sin dudarlo.
MI ASESOR	Juan David Alvarado, ya que me brindo todo el apoyo en mi trabajo de graduación, a pesar del tiempo que transcurrió.
MIS CATEDRÁTICOS	Por exigir al máximo el potencial que tiene el grupo.
FACULTAD DE INGENIERÍA, USAC	Por haberme abierto sus puertas y darme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria, así poder contribuir al desarrollo de Guatemala. Además tengo el orgullo y el honor de poder decir que me gradué de la gloriosa Universidad de San Carlos de Guatemala y que soy san carlista de corazón.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE ABREVIATURAS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XXI
OBJETIVOS	XXIII
HIPÓTESIS	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. FIBRA ÓPTICA	1
1.1. Introducción a la fibra óptica	1
1.2. Espectro óptico y nuevas bandas de operación	2
1.2.1. Banda "O" (<i>Original</i> , original)	2
1.2.2. Banda "E" (<i>Extended</i> , extendida)	3
1.2.3. Banda "C" (<i>Conventional</i> , convencional)	3
1.2.4. Banda "S" (<i>Short</i> , corta)	4
1.2.5. Banda "U" (<i>Ultralong</i> , ultralarga)	4
1.2.6. Banda "L" (<i>Long</i> , larga)	5
1.3. Fibra monomodo y multimodo	6
1.3.1. Fibra óptica 62,125 μm	6
1.3.2. Fibra óptica 50/125 μm	6
1.3.3. Fibra óptica STD	7
1.3.4. Fibra DS	7

1.3.5	Fibra óptica de banda extendida	7
1.3.6	Fibra óptica de mínima pérdida	7
1.3.7	Fibras NZ-DSF (non-zero dispersion shifted fibers)	8
1.4	Utilización de las ventanas ópticas	10
2	CONCEPTOS BÁSICOS DE DWDM	13
2.1	Factores que influyen en el presupuesto de enlace óptico	13
2.1.1	Presupuesto en pérdidas de los conectores y empalmes	14
2.2	Penalizaciones en el presupuesto de un enlace óptico	15
3	DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL AMPLIFICADOR ÓPTICO EDFA	19
3.1	Historia	21
3.2	Funcionamiento	21
3.3	Características técnicas	24
3.4	Características de ganancia	26
3.5	Segunda ventana de ganancia	28
3.6	Ganancia de saturación	29
3.7	Co-dopantes	30
3.8	Longitud del amplificador	31
3.9	Longitud de onda de la señal de bombeo	32
3.10	Dirección del bombeo	33
3.11	Revestimiento del bombeo	34
3.12	Multifase de los EDFAs	36
3.13	Ruido en EDFAs	37
3.14	Sistema de Salto	39
4	DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL AMPLIFICADOR ÓPTICO DE EFECTO RAMAN	41
4.1	Cambio de longitud de onda utilizando SRS	42
4.2	Dispersión estimulada de Raman (SRS)	44

4.3	Dispersión estimulada de Brillouin (SBS)	46
4.3.1	Chirp	49
4.4	Rejilla de Fibra de BRAGG	50
4.4.1	Principio de operación	51
4.4.2	Características de la rejilla de fibra de Bragg	52
4.5	Banda 1310nm del amplificador de efecto Raman	54
5	ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS AMPLIFICADORES EDFA Y EFECTO RAMAN	57
5.1	Análisis del amplificador óptico EDFA	57
5.2	Análisis del amplificador óptico Raman	65
5.3	Comparativa de los amplificadores EDFA vrs. Raman	73
5.4	Amplificadores EDFA/Raman utilizando el mismo láser de bombeo	77
5.4.1	Introducción	77
5.4.2	Principio de la propuesta del amplificador con banda híbrida C+L	79
5.4.3	Configuración experimental	81
5.4.4	Discusión de los resultados de la banda híbrida	82
5.4.5	Resumen de la configuración de banda híbrida	84
6	MÉTODO GUÍA PARA LA UTILIZACIÓN DE LOS AMPLIFICADORES EDFA Y RAMAN	87
6.1	Introducción	87
6.2	Resultados utilizando el Método A	94
6.2.1	Tabulación de datos	94
6.2.2	Explicación de las condiciones	96
6.2.3	Tabla de datos	99
6.2.4	Gráficas	100
6.3	Resultados utilizando el Método B	102

6.3.1	Tabulación de datos	102
6.3.2	Explicación de las condiciones	104
6.3.3	Tabla de datos	105
6.3.4	Gráficas	106
6.4	Discusión resultados de los dos métodos	107
CONCLUSIONES		111
RECOMENDACIONES		113
BIBLIOGRAFÍA		115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Clasificación de la fibra óptica.	1
2	Factores que afectan la propagación.	2
3	Atenuación respecto a la longitud de onda.	10
4	Rango de ventanas.	12
5	Función del amplificador de fibra dopado con Erblio.	19
6	Funcionamiento del amplificador de fibra dopado con Erblio.	20
7	<i>Erbium Doped Optical Fibre Amplifier.</i>	22
8	Curva de ganancia típica de un EDFA.	25
9	Respuesta en cascada de los EDFAs.	26
10	Comportamiento de un EDFA en saturación de ganancia.	28
11	Niveles de energía del amplificador co-dopado de Erblio/Ytterbio.	29
12	Configuración del revestimiento del bombeo.	35
13	Dos Fases de los amplificadores EDFA con bombeo compartido.	35
14	Falla de un amplificador y el sistema continúa operando.	38
15	Cambio de longitud de onda utilizando SRS.	40
16	Cambiador de longitud de onda utilizando FBGs.	41
17	Múltiples estados de las longitudes de onda.	42
18	Dispersión estimulada de Raman.	43
19	Onda de Stokes.	45
20	Umbral de SBS versus longitud de onda (μm).	46
21	Esquema Rejilla de Fibra de Bragg.	48
22	Principio de operación de la rejilla de fibra de Bragg.	49
23	Parámetros de la rejilla de fibra de Bragg.	50
24	Espectro de reflexión de 1 cm de largo FBG con un contraste IR bajo.	51
25	Amplificador Raman en 1310 nm utilizando FBG.	52
26	Fibra dopada con Erblio.	54

27	Emisión espontanea y absorción de un EDFA.	55
28	Comparación del bombeo 980 nm con 1480 nm.	56
29	Esquema de ganancia de un EDFA.	57
30	Longitud versus ganancia.	58
31	Bombeo versus ganancia.	58
32	Emisión espontánea amplificada (ASE).	59
33	Rango de amplificación de un EDFA.	60
34	Ganancia de un EDFA y de un RFA.	63
35	Ganancia de un amplificador Raman.	64
36	Amplificador Raman.	65
37	Bombeo hacia atrás en la fibra de transmisión.	66
38	Raman trabaja en diferentes bandas de operación.	72
39	EDFA + Raman.	73
40	Potencia señal EDFA + Raman de un sistema periódico amplificado.	73
41	EDFA + Raman, mejora del OSNR.	73
42	Utilización de un láser de bombeo para las bandas C/EDFA y L/RFA.	76
43	Diagrama propuesto para la banda híbrida EDFA/RFA.	78
44	Configuración experimental para la banda C+L EDFA/RFA.	79
45	Medida general para obtener el espectro de la banda C+L EDFA/RFA.	80
46	Medición de la figura de ruido de la banda C+L vrs longitud de onda.	81
47	Esquema del amplificador híbrido de banda C+L EDFA/RFA.	82
48	Pantalla principal del programa.	83
49	Muestra la distancia máxima de un Span.	84
50	Redundancia por enlace.	84
51	Redundancia por Span.	85
52	Holgura en que llega la señal al receptor.	87
53	Pantalla de ingreso de datos Método A.	89
54	Pantalla de resultados del Método A.	89
55	Pantalla de ingreso de datos Método B.	90
56	Pantalla de resultados del Método B.	90
57	Ingreso de datos del utilizando el Método A.	91
58	Resultados de la matriz A.	91
59	Ingreso de datos para el Método A.	92
60	Resultados del Método A.	92
61	Distancia máxima de un span vrs Holgura con 8 lambdas.	96

62	Distancia máxima de un span vrs holgura con 16 lambdas.	97
63	Ingreso de datos en el Método B.	98
64	Resultados de la matriz A.	98
65	Ingreso de datos al Método B.	99
66	Resultado método B.	99
67	Distancia máxima del Span vrs holgura.	103
68	Gráfica demostrativa de las regiones para EDFA y Raman.	105

TABLAS

I	Definición de bandas de operación para los sistemas ópticos.	5
II	Fibra multimodo.	6
III	Fibra monomodo.	7
IV	Características ópticas de la fibra.	9
V	Características físicas de la fibra.	9
VI	Valores de potencia de la señal.	57
VII	Tabla comparativa EDFA vrs Raman.	74
VIII	Relación entre los factores de un enlace y los amplificadores ópticos.	85
IX	Potencia transmisión y recepción.	88
X	Coefficiente de atenuación para fibra G.652 y G.655.	88
XI	Resultados del programa, Método A.	95
XII	Valores utilizados para la figura 60.	96
XIII	Valores utilizados para la figura 61.	97
XIV	Resultados del programa, Método B.	101
XV	Resultados reflejados en la figura número 66.	103

LISTA DE ABREVIATURAS

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CPM	<i>Continuous Phase Modulation</i>
CW	<i>Continuous Wave</i>
DCF	<i>Dispersion Compensating Fiber</i>
DFB	<i>Distributed Feedback Laser</i>
DRA	<i>Distributed Raman Amplification</i>
DSF	<i>Dispersion Shifted Fiber</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FDDI	<i>Fiber Distributed Data Interface</i>
FWM	<i>Four Wave Mixing</i>
IR	Índice de refracción
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
ITU-T	<i>Telecommunication Standardization Sector of ITU</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LC	<i>Local Connector or Little Connector</i>
LD	<i>Laser Diode</i>
LED	<i>Ligth Emitting Diode</i>
MMF	<i>Multimode Fiber</i>
NDSF	<i>Non Dispersion Shifted Fiber</i>
NF	<i>Noise Figure</i>

nm	Nanómetros
NZ-DSF	<i>Non Zero Dispersion Shifted Fiber</i>
OADM	<i>Optical Multiplexer add/drop</i>
OSC	<i>Optical Supervisory Channel</i>
OLA	<i>Optical Line Amplifier</i>
OSNR	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i>
OTDR	<i>Optical Time Domain Reflectometer</i>
PBC	<i>Polarization Beam Combiner</i>
PDFA	<i>Praseodymium Doped Fiber Amplifier</i>
PDG	<i>Polarization Dependent Gain</i>
PFA	<i>Plastic Fiber Amplifier</i>
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
PON	<i>Passive Optical Networks</i>
PS	<i>Phase-Shift</i>
ps	Pico Segundo
RFA	<i>Raman Fiber Amplifier</i>
RI	<i>Refractive Index</i>
ROADM	<i>Reconfigurable OADM</i>
RP	<i>Residual Pumping Power</i>
SBS	<i>Stimulated Brillouin scattering</i>
SC	<i>Subscriber Connector or Standard Connector</i>
SLA	<i>Semiconductor Laser Amplifier</i>
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>
SPM	<i>Self-phase modulation</i>
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i>

ST	<i>Straight Tip</i>
TDFA	<i>Thulium Doped Fiber Amplifier</i>
TFF	<i>Dielectric Multilayered Thin Film Filter</i>
TLS	<i>Tunable Laser Source</i>
YDFA	<i>Ytterbium Doped Fiber Amplifier</i>

GLOSARIO

ADM Add/Drop Multiplexer

Es un dispositivo que agrega canales de menor velocidad o los remueve de la transmisión para entregarlos en canales separados.

Ancho de banda

Rango de frecuencias ocupado, se obtiene al restar la frecuencia inferior de la superior que se utiliza.

Backbone

Mecanismo de conectividad primario en un sistema distribuido. Todos los sistemas que tengan conexión al *backbone* (columna vertebral) pueden interconectarse entre sí, aunque también puedan hacerlo directamente o mediante redes alternativas.

Banda ancha

Transmisión de datos a alta velocidad.

Banda base

Señal sin modificar, es proporcionada por la fuente de la información, puede ser una señal de audio, datos o video.

BER	La fracción de secuencia de bits que están en error, es el parámetro para medir que tan seguido se dañan los bit en un transmisión o medio.
BERT	Tasa de errores para verificación de un enlace.
Bit	Unidad binaria de información, representada por un dígito binario o por uno de dos estados eléctricos.
dB	Abreviatura para decibel. Una décima parte del logaritmo común de la razón de las potencias relativas, igual a 0.1 B (bel). El decibel es la relación convencional para la potencia y es adimensional.
dBm	Abreviatura para decibel referido a un miliWatt, dBm es utilizado en comunicaciones como medida de valores absolutos de potencia. Cero dBm es igual a 1 miliWatt.
Decibel	Se denomina decibelio a la unidad empleada en Acústica y Telecomunicación para expresar la relación entre dos potencias, acústicas o eléctricas.

Difracción	En física, la difracción es un fenómeno característico de las ondas que consiste en la dispersión y curvado aparente de las ondas cuando encuentran un obstáculo. La difracción ocurre en todo tipo de ondas, desde ondas sonoras, ondas en la superficie de un fluido y ondas electromagnéticas como la luz y las ondas de radio
Eficacia	Es la característica de un sistema de cumplir con el objetivo para el cual fue creado.
Eficiencia	Es la característica de un sistema de cumplir con el objetivo para el cual fue creado, utilizando la menor cantidad de recursos.
Enlace	Es el medio por el cual se transporta información.
Espectro de frecuencias	Rango de frecuencias.
FDDI	Es un conjunto de estándares ISO y ANSI para la transmisión de datos en redes de computadoras de área extendida o local (LAN) mediante cable de fibra óptica

Fibra óptica

Es una guía de ondas en forma de filamento, generalmente de vidrio, en realidad, de polisilicio, aunque también puede ser de materiales plásticos, capaz de guiar una potencia óptica, lumínica, generalmente, introducida por un laser, o por un LED.

FWM

es una mezcla de cuatro ondas y este efecto es producto de la polarización no lineal presente en la Fibra Óptica, cuando las señales son introducidas en esta, resultando la aparición de nuevas señales a distintas longitudes de onda.

Interfaz

Conexión con un medio de transmisión por la que se envían los paquetes.

Multiplexar

Enviar varias señales en una sola transmisión, para aumentar el número de canales de voz disponibles.

O – E – O

Siglas que significan conversión de medios en Óptico – Eléctrico – Óptico.

OC – 1

Optical Carrier one - línea de transmisión uno, es una línea de transmisión SONET con una velocidad de 51.84 Mbits/s.

OSNR

Aunque el BER es el parámetro que mejor caracteriza el comportamiento de un enlace, esta principalmente determinado por la relación señal a ruido óptico (OSNR). Por consiguiente, el OSNR es un parámetro que siempre es determinado cuando se instala un sistema de DWDM. OSNR se representa gráficamente como la razón entre la señal y potencia de ruido como una función de longitud de onda.

PDH

La Jerarquía Digital Plesiócrona, conocida como (*Plesiochronous Digital Hierarchy*), es una tecnología usada en telecomunicación para transportar grandes cantidades de información mediante equipos digitales de transmisión que funcionan sobre fibra óptica, cable coaxial o radio de microondas.

PMD

Dispersión de modo polarizada, es una forma de la dispersión modal en donde dos diferentes polarizaciones de luz en una guía de onda, que normalmente viajan a la misma velocidad, estas viajan a velocidades distintas debido a imperfecciones aleatorias y asimétricas.

QoS	Calidad de servicio. Es un set métrico usado para medir la calidad de disponibilidad de transmisión y de servicio de cualquier sistema dado de transmisión.
Reflexión	En óptica: proceso por el cual un rayo de luz que incide sobre una superficie "rebota" sobre ésta. El ángulo con la normal a esa superficie que forman los rayos incidente y reflejado son iguales. Además, se produce, también, un fenómeno de absorción diferencial en la superficie, por el cual la energía y espectro del rayo reflejado no coinciden con la del incidente.
Refracción	Es el cambio de dirección de una onda debido al cambio de velocidad. Esto ocurre cuando las ondas pasan de un medio con un índice de refracción dado a un medio con otro índice de refracción. Cambio de dirección de la luz.
Rx	En telecomunicaciones, se refiere a una línea de recepción de datos. Esta puede ser física o lógica.
SC, ST, FC y LC	Nombre que reciben los conectores utilizados en la Fibra Óptica.

SDH

Synchronous Digital Hierarchy Estándar europeo que define una serie de tasas y formatos normalizados que se transmiten usando señales sobre fibra óptica. SDH es similar a SONET, con una tasa básica de 155,52 Mbps, diseñado en STM1.

Sensibilidad

Nivel mínimo de recepción de la señal que el receptor admite para asegurar el funcionamiento del circuito “control automático de ganancia”.

STM – 1

Módulo de Transporte Síncrono (*Synchronous Transport Module*). Unidad de transmisión básica de la Jerarquía Digital Síncrona (SDH), correspondiente al primer nivel básico (155.52 Mbps).

Tx

En telecomunicaciones, se refiere a una línea de transmisión de datos. Esta puede ser física o lógica.

RESUMEN

En el diseño de sistemas de comunicaciones ópticas, es muy importante tener en cuenta los elementos que están involucrados, como por ejemplo: la fibra óptica, tipo de amplificador, redundancia del enlace, etc. En los sistemas DWDM la fibra recomendada es la G.655, pero existen sistemas los cuales fueron diseñados con la fibra G.652, la cual también es utilizada para el diseño e implementación de enlace utilizando DWDM.

Los sistemas de Fibra Óptica pueden clasificarse de acuerdo a la distancia máxima de transmisión, las distancias mayores a 1000 Km tienen las mayores exigencias en cuanto al ASE (Amplified Spontaneous Emission), este es el factor limitante y que afecta la exigencia de calidad de los amplificadores ópticos. A mayor distancia total del sistema de fibra óptica el ruido ASE en cada amplificador óptico debe ser menor en consideración al número total de puntos de amplificación óptica.

Un amplificador de fibra dopado con Erblio consiste en una sección típicamente corta (10 metros más o menos) la sección de fibra pequeña que contiene el elemento de tierra rara donde el Erblio fue agregado al vidrio.

Estos amplificadores utilizan el principio de la difusión estimulada Raman o en inglés llamado "Stimulated Raman Scattering" (SRS). El interés por estos amplificadores resurgió a finales de los años noventa, debido a innovaciones en diseño de la rejilla de fibra de Bragg o en inglés llamado "Fiber Bragg Grating" (FBG).

OBJETIVOS

- **General:**

Desarrollar una serie de criterios de selección para los amplificadores de fibra óptica tipo óptico-óptico en DWDM.

- **Específicos:**

1. Conocer los tipos de fibra que se utilizan en los sistemas DWDM.
2. Enlistar los tipos de amplificadores de fibra óptica que existen.
3. Explicar el funcionamiento de los amplificadores Raman y EDFA.
4. Crear una solución sobre la utilización de los amplificadores ópticos.
5. Proponer un método para la aplicación de los amplificadores Raman y EDFA en las actuales redes de fibra óptica de nuestro país.

HIPÓTESIS

El amplificador Raman es el más indicado a utilizar en las redes de fibra óptica en nuestro país, debido a su buen costo-efectividad del mismo. Dada la carencia de conocimiento de la tecnología DWDM se encarecen proyectos de fibra óptica de larga distancia el cual también limita el ancho de banda del enlace.

INTRODUCCIÓN

En cualquier enlace de comunicaciones ópticas llega el momento en que es necesario regenerar la señal que se ha degradado por la atenuación, en las redes ópticas se debe de tener un elemento que pueda compensar las pérdidas por atenuación y así alcanzar distancias mayores sin realizar conversiones opto electrónicas, por lo que este elemento es el amplificador óptico que no realiza las conversiones, sino que amplifica el flujo de fotones.

El uso de amplificadores ópticos revolucionó los sistemas de comunicaciones ópticas e hicieron posible la utilización de sistemas (WDM y Dense WDM), anteriormente se diseñaban las redes teniendo la atenuación como un parámetro fundamental a tomar en cuenta, esto fue cambiando debido a que los amplificadores ópticos acumulan dispersión, por lo que ahora se trata de compensar dicha dispersión en el diseño de nuevos sistemas ópticos.

El presente trabajo surgió del interés de cómo escoger un tipo de amplificador usando criterios establecidos y analizando las capacidades de cada uno. Se investigó y se desarrollo este trabajo tomando en cuenta las tendencias tecnológicas en el diseño de sistemas de comunicaciones ópticas.

La aplicación de la teoría en la toma de decisiones y de observaciones prácticas, llevaron a la recolección de diversos criterios, consejos y estándares a tomar en consideración en el diseño de sistemas ópticos.

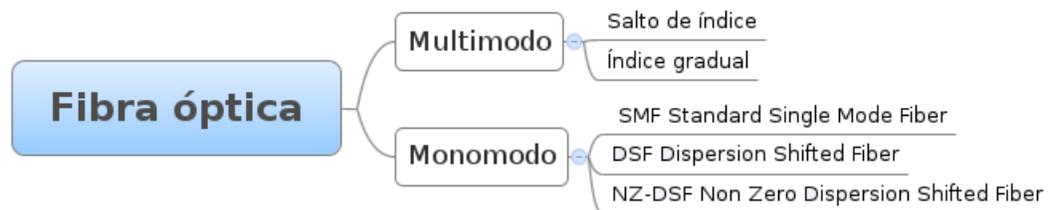
Este trabajo es una guía para la toma de decisiones para el diseño y/o adquisición de equipo en un sistema de comunicación óptica, ya que además de los parámetros que se incluyen en este documento, se puede realizar un análisis mas profundo debido a parámetros específicos que no están incluidos dentro de los criterios.

1. FIBRA ÓPTICA

1.1 Introducción a la fibra óptica

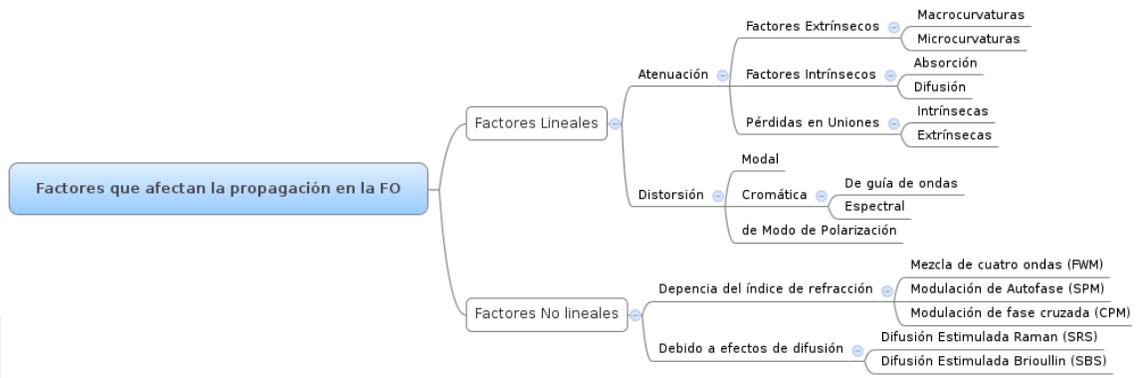
Actualmente en aplicaciones de larga distancia se utilizan exclusivamente fibras monomodo, que ofrecen un valor más bajo de atenuación y una mayor capacidad de transmisión. La fibra monomodo definida en la recomendación G.652 de la ITU-T, es la más común en las instalaciones realizadas desde que se explota la tecnología monomodo. La atenuación mínima se obtiene en la ventana de 1550 nm, y la dispersión cromática mínima en la ventana de 1310 nm, por lo tanto, no pueden garantizarse las mejores condiciones de pérdida y dispersión, simultáneamente. Lo anterior impulsó a la industria a crear fibras con mejores prestaciones en cuanto a dispersión y ancho de banda efectivo.

Figura 1. Clasificación de la fibra óptica.



Fuente: <http://www.serprotel.com.ar/areas/cursos.html>

Figura 2. Factores que afectan la propagación.



Fuente: <http://www.serprotel.com.ar/areas/cursos.html>

1.2 Espectro óptico y nuevas bandas de operación

La fibra óptica tiene la posibilidad de operar en un amplio rango espectral, que va más allá de las tres “ventanas” de operación tradicionales que entregan las fibras comunes, y debido a esto, es muy importante la definición de las bandas de operación que comprende el espectro óptico extendido. La ITU-T a través del suplemento 39 de la serie de recomendaciones "G" (*Diseño de Sistemas Ópticos y Consideraciones de Ingeniería*) de Octubre de 2003, ha establecido una nueva definición de bandas de operación para los sistemas ópticos, las que son definidas a continuación.

1.2.1 Banda "O" (*Original, original*)

Definida a partir de 1260 nm por encontrarse en este punto la longitud de onda de corte para las fibras G.652. Para este punto la dispersión cromática en el peor caso es de $-6.42 \text{ ps/km}\cdot\text{nm}$, su equivalente positivo debido a la pendiente de dispersión ocurre en 1375 nm, pero este punto cae sobre la ascendente del pico de absorción de agua cuyo máximo está en 1383. Por esto se define el límite superior de esta banda en 1360 nm.

1.2.2 Banda "E" (*Extended, extendida*)

La última actualización de la recomendación G.652 de marzo de 2003, incluye como sub-categorías G.652.C y G.652.D, la estandarización de fibras que disminuyen la atenuación producida por el pico de absorción de agua, y que permiten la transmisión en las longitudes de onda que este comprende. El efecto de absorción debido a los iones OH^- es imperceptible más allá de los 1460 nm, razón por la cual esta banda está definida entre 1360 y 1460 nm.

1.2.3 Banda "C" (*Conventional, convencional*)

En la recomendación G.957 (interfaces ópticas para equipos y sistemas relacionados con la jerarquía digital síncrona) se designó la zona desde 1430 nm a 1580 nm para aplicaciones de corta distancia con fibra G.652, y la zona entre 1480 nm y 1580 nm para aplicaciones de larga distancia con fibra G.652, G.653, y G.654. Estos límites fueron impuestos debido a consideraciones de atenuación, y en algunos casos por limitaciones, debido a la dispersión cromática. Para aplicaciones con amplificadores ópticos tanto monocanal como multicanal, estos rangos fueron más tarde subdivididos. En esta subdivisión, la zona que utilizan los amplificadores EDFA, de uso mayoritario en la actualidad, va desde 1530 a 1565, valores con los cuales se define esta banda. Sin embargo esto es solo una definición y no limita la zona de operación de los EDFA, ya que existen algunos diseños de estos que exceden los límites de esta banda.

1.2.4 Banda "S" (*Short, corta*)

La zona comprendida entre los límites de las bandas E y C se denomina la banda S. No obstante, en aplicaciones particulares, no se dispone de la banda completa para canales de información propiamente tal. Algunas longitudes de onda pueden ser utilizadas por los láseres de bombeo que necesitan los amplificadores ópticos, ya sean los del tipo ion-activo como los de Raman. También algunos canales pueden ser asignados para el canal de supervisión óptica de los sistemas WDM (OSC, *Optical Supervisory Channel*).

1.2.5 Banda "U" (*Ultralong, ultralarga*)

Para casos de mantenimiento y pruebas en las redes de fibra óptica en operación (generalmente con OTDR's), estos procesos deben llevarse a cabo ya sea introduciendo el láser del instrumento a la fibra fuera de tráfico, o estando esta en tráfico y ubicar la longitud de onda de prueba por medio de multiplexión óptica dentro de la banda de transmisión. La intención de definir la banda U se basa en que, en sistemas futuros, sea posible realizar un monitoreo de la fibra en tráfico por medio de la ubicación de la longitud de onda de prueba en regiones que no son utilizadas por las longitudes de onda de transmisión. Esta banda se define desde 1625 a 1675 nm, ya que esta zona es una región atractiva para futuras longitudes de onda de mantención, pese a su elevada atenuación, pues se pretende que nunca sea ocupada por canales de transmisión.

1.2.6 Banda "L" (Long, larga)

Para longitudes de onda superiores a la banda C, el rendimiento del cable de fibra óptica dentro de un rango de temperaturas específico es adecuado para 1625 nm, para los tipos de fibras actuales. Mas aún, es recomendable el uso de rangos lo mas ancho posibles para la transmisión de señal. Esto define la banda L que va desde 1565 a 1625 nm.

Tabla I. Definición de bandas de operación para los sistemas ópticos.

Banda	Descriptor	Rango (nm)
Banda O	Original (Original)	1260 a 1360
Banda E	Extended (Extendida)	1360 a 1460
Banda S	Short (Longitud de onda corta)	1460 a 1530
Banda C	Conventional (Convencional)	1530 a 1565
Banda L	Long (Longitud de onda larga)	1565 a 1625
Banda U	UltraLong (Longitud de onda ultra larga)	1625 a 1675

Actualmente las redes que utilizan amplificación óptica, en su gran mayoría emplean amplificadores EDFA. Sin embargo este tipo de amplificadores tiene un ancho de banda de operación limitado (aproximadamente 35 THz) que se ubica en la banda "C" comprendida entre 1530 y 1565 nm, lo cual no permite un completo aprovechamiento del espectro óptico disponible. Para solucionar este problema, han surgido técnicas de amplificación variadas, tales como amplificadores EDFA de banda dual (operan en las bandas C y L) y amplificadores basados en el efecto (SRS). Es por esto que la nueva generación de fibras ópticas para redes de transmisión de larga distancia que requieran de amplificación, deben considerar la operación con estas nuevas tecnologías de amplificación, y muy especialmente deben tener en cuenta la amplificación de Raman, ya que ella ha tenido un fuerte desarrollo y se espera que sea la tecnología de amplificación óptica predominante en el futuro.

1.3 Fibra monomodo y multimodo

En la tabla II y tabla III podemos observar algunas de las características de las fibras multimodo y monomodo.

Tabla II. Fibra multimodo.

	EIA-492; ISO/IEC 793 FIBRA MULTIMODO 62,5/125	ITU-T G.651 FIBRA MULTIMODO 50/125
Apertura Numérica	NA de 0.275 (tolerancia 0.015)	NA=0, 18 a 0.24 (tolerancia 10%)
Perfil de índice de refracción	Parabólico (graded index). Usado en redes de datos y FDDI	Parabólico
Índice de refracción	1.90%	
Diámetro del núcleo	62.5 μm (tolerancia 3 μm)	50 μm (tolerancia 3 μm)
Diámetro del revestimiento (Cladding)	125 μm (tolerancia 1 μm)	125 μm (3 μm)
Recubrimiento de silicona	245 μm (tolerancia 10 μm)	245 μm (tolerancia 10 μm)
Longitud de onda de aplicación	850 y 1300 nm	850 y 1300 nm
Atenuación a 850 nm	Entre 3 y 3.2 dB/km	Entre 2.7 y 3 dB/km
Atenuación a 1300 nm	Entre 0.7 y 0.8 dB/km	Entre 0.7 y 0.82 dB/km
Atenuación a 850 nm	Entre 200 y 300 MHz.km	Entre 300 y 500 MHz
Atenuación a 1300 nm	Entre 400 y 600 MHz.km	Entre 500 y 1000 MHz

Fuente: Eduardo Zamora Espinoza, Nuevas Tecnologías de Fibras Ópticas y su Implementación.

1.3.1 Fibra óptica 62,125 μm

Es una fibra multimodo con perfil de índice de refracción gradual (*Graded Index*), este tipo de fibra es una normalización norteamericana ANSI. Es usada en redes de datos FDDI para conexiones dúplex en anillos.

1.3.2 Fibra óptica 50/125 μm

Es una fibra multimodo con perfil de índice parabólico normalizada por ITU-T G.651, estas fibras son utilizadas en la actualidad en redes de datos de corta longitud (hasta 2 km) y fue la única fibra disponible hasta inicios de los años 80 y se utilizaba en 850 o 1300 nm.

Tabla III. Fibra Monomodo.

SMF (G.652)	DSF (G.653)	NZDSF (G.655)	Extended Band (G6.52.C)
Excelente TDM a 1310 nm	Excelente TDM a 1550 nm	Excelente DWDM (Banda L)	Excelente TDM a 1310 nm
Bien TDM a 1550 nm	Bien TDM a 1310 nm	Excelente TDM a 1550 nm	Bien DWDM
Bien DWDM	Malo DWDM (Banda C)	Bien TDM a 1310 nm	Bien TDM a 1550 nm

Fuente: Eduardo Zamora Espinoza, Nuevas Tecnologías de Fibras Ópticas y su Implementación.

1.3.3 Fibra óptica STD

Es un tipo de fibra monomodo (SMF) normalizada en ITU-T G.652, es una de las fibras más utilizadas en los sistemas de comunicación actual, se puede utilizar en 1300 y 1550 nm. Esta fibra está optimizada para obtener cero de dispersión cromática en 1300 nm. Posee una dispersión de +16 a +18 ps/km·nm.

1.3.4 Fibra DS

Pertenece a la fibra monomodo de dispersión desplazada (DSF) normalizada en ITU-T G.653. Permite gran ancho de banda en redes de larga distancia trabajando en tercera ventana, este tipo de fibra tiene cero en la dispersión cromática en 1540 nm. La dispersión tiene un valor de -2 a +2 ps/km·nm.

1.3.5 Fibra óptica de banda extendida

Esta fibra no se define en las tres ventanas de trabajo, en cambio se define el rango de longitudes de onda en la cual se trabajará.

1.3.6 Fibra óptica de mínima pérdida

Es una fibra monomodo con un mínimo de atenuación, está normalizada en ITU-T G.654, se aplica en enlaces de muy larga distancia en 1550 nm es de aplicaciones reducidas debido al poco rendimiento en lo que se refiere a la dispersión cromática, no es aplicable para sistemas STM-16.

1.3.7 Fibras NZ-DSF (Non-zero dispersion shifted fibers)

En el aspecto normativo, actualmente las fibras NZ-DSF están agrupadas bajo la norma G.655 de la ITU-T que posee tres clases: G.655.A; G.655.B y G.655.C. Ellas se diferencian esencialmente en que la fibra de tipo "A" describe la fibra NZDSF original, sin los requerimientos actuales de PMD o banda L; la de tipo "B" comprende los nuevos tipos de fibra que cumplen con los requerimientos de PMD y de banda extendida al aumentar el valor absoluto máximo del coeficiente de dispersión cromática a 10 [ps/km•nm], pero con una diferencia máxima entre el valor mínimo y el máximo dentro de la banda en valor absoluto de 5 [ps/km•nm]. Esto significa que la norma limita el valor de la pendiente de dispersión de la fibra. Finalmente la de tipo "C" además de cumplir con los requerimientos de PMD y de banda extendida, contempla las fibras de última generación que han logrado disminuir el coeficiente de PMD. Sin embargo el aspecto normativo es solo el punto de partida y, en general, las fibras NZ-DSF de nueva generación cumplen sobradamente con estos requerimientos y se diferencian entre ellas por características aún más específicas.

Como se sabe, las NZ-DSF tradicionales están optimizadas para la transmisión en la banda C (Convencional), ya que en esta zona entregan una baja atenuación de alrededor de 0.2 dB/km, y un coeficiente de dispersión cromática bajo, pero no igual a cero (típicamente de ± 3 a ± 5 ps/km•nm) para minimizar los efectos de los fenómenos no lineales principalmente el FWM (*Four Wave Mixing*). En este tipo de fibras las mejoras que se introducen a las ya conocidas NZ-DSF tradicionales son:

- Fibras NZ-DSF con un Área Efectiva Extendida
- Fibras NZ-DSF con baja pendiente de Dispersión

Tabla IV. Características ópticas de la fibra.

Características Ópticas	Unidad	Fibra Monomodo (ITU-T G.652.B)	Fibra Monomodo Pico de Agua Cero (ITU-T G.652.D)	Fibra Monomodo de Dispersión No Cero (ITU-T G.655)
Atenuación Óptica en 1310 nm	dB/km	0.35	0.32	0.38
Atenuación Óptica en 1310 nm	dB/km	0.37	0.34	-
Atenuación Óptica en 1550 nm	dB/km	0.20	0.19	0.22
Atenuación Óptica en 1550 nm	dB/km	0.23	0.21	0.24
Dispersión Cromática en 1310 nm	ps/nm.km	≤3.5	≤2.5	-
Dispersión Cromática en 1550 nm	ps/nm.km	≤18	≤1.7	-
Dispersión Cromática en Banda C (1530-1565 nm)	ps/nm.km	-	-	2.6 - 6.0
Dispersión Cromática en Banda L (1565-1625 nm)	ps/nm.km	-	-	4.0 - 8.9
PMD Máximo en la fibra	ps/v(km)	0.2	0.1	0.1

Fuente: Eduardo Zamora Espinoza, Nuevas Tecnologías de Fibras Ópticas y su Implementación.

Tabla V. Características físicas de la fibra.

Características Dimensionales	Unidad	Fibra Monomodo (ITU-T G.652.B)	Fibra Monomodo Pico de Agua Cero (ITU-T G.652.D)	Fibra Monomodo de Dispersión No Cero (ITU-T G.655)
Diámetro de la Cáscara	μm	125±2	125±0.7	125±0.7
Diámetro del Revestimiento	μm	245±10	245±5	245±5
Error de Concentricidad Campo Modal / Cáscara	μm	≤0.8	≤0.5	≤0.7
No Circularidad de la Cáscara	%	≤2	≤1	≤1
Error de Concentricidad Fibra / Revestimiento	μm	≤12	≤12	≤12

Fuente: Eduardo Zamora Espinoza, Nuevas Tecnologías de Fibras Ópticas y su Implementación.

1.4 Utilización de las ventanas ópticas

Actualmente se trabaja en las tres bandas de frecuencia marcadas en la figura, y que se conocen con el nombre de ventanas:

- 1ª ventana a 850 nm
- 2ª ventana a 1300 nm
- 3ª ventana a 1550 nm

Figura 3. Atenuación respecto a la longitud de onda.



Fuente: <http://200.27.147.163/planta/menu/fibra.htm>

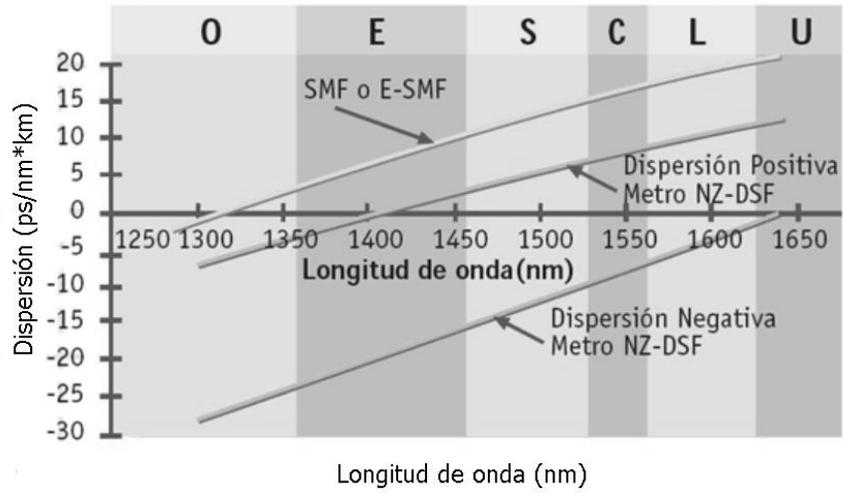
Existen cuatro ventanas dentro del espectro infrarrojo que fue explotado en la transmisión por fibra óptica. La primera ventana, cerca de los 850 nm, se usó casi exclusivamente para aplicaciones multimodo de distancias cortas. Las fibras NDSF, comúnmente llamada la fibra monomodo estándar, se diseñó para usarla en la segunda ventana, cerca de los 1310 nm. Para optimizar el rendimiento de la fibra óptica en esta ventana, la fibra fue diseñada de forma que la dispersión cromática fuera cercana a cero para una longitud de onda de 1310 nm.

A medida que la fibra óptica se hacía más común y aumentaban las necesidades de un mayor ancho de banda y mayores distancias, se explotó una tercera ventana, cercana a los 1550 nm, en transmisión monomodo.

La tercera ventana o banda C, ofreció dos ventajas: tenía menos atenuación y su frecuencia de operación era la misma que la de los nuevos amplificadores dopados con erbio (EDFAs). Sin embargo sus características de dispersión lo limitan severamente. Esto se solucionó con el uso de láseres de una banda más estrecha y más potentes. Pero debido a que la tercera ventana tiene menor atenuación que la ventana de 1310 nm, los fabricantes se han decantado por el tipo DSF, que desplaza el punto de dispersión cero a la región de los 1550 nm. Aunque ahora esta solución significa que la atenuación óptica menor y el punto de dispersión cero coinciden con la ventana de 1550 nm, resulta que hay no linealidades destructivas en la fibra óptica cerca del punto de distorsión cero y no hay compensación efectiva a ello. Por esta limitación, estas fibras no sirven para aplicaciones DWDM.

El tercer tipo, NZ-DSF, está diseñado específicamente para cubrir las necesidades de las aplicaciones DWDM. La dirección de este diseño es hacer la dispersión baja en la región de 1550 nm, pero no cero. Efectivamente esta estrategia introduce una cantidad controlada de dispersión, que cuenta los efectos no lineales tales como la mezcla de cuatro ondas que pueden perjudicar el rendimiento de los sistemas DWDM.

Figura 4. Rango de ventanas.



Fuente: http://orbita.starmedia.com/fortiz/Mediciones/Mediciones_Redres_Metro_01.html

2. CONCEPTOS BÁSICOS DE DWDM

La multiplicación por densidad de longitud de onda es una tecnología que consiste en enviar varias fuentes de datos en una fibra óptica, cada fuente posee una señal portadora también llamada longitud de onda (denominado lambda " λ ") y cada una de estas señales ingresa a la fibra al mismo tiempo sin que una interfiera a la otra. Utilizando esta tecnología se puede tener más de 80 señales (cada una con diferente longitud de onda) o canales que se pueden multiplexar en una simple fibra óptica, cada canal se multiplexa por división de tiempo. Cuando todos los canales son demultiplexados y todas las señales vuelven al formato original como por ejemplo datos de: IP (*Internet Protocol*), SONET (*Synchronous Optical Network*), ATM (*Asynchronous Transfer Mode*). Todos estos formatos de datos pueden ir al mismo tiempo en una sola fibra sin que exista algún problema de intercambio de datos. Sin embargo la demanda para utilizar esta tecnología esta creciendo y conforme sea mas el ancho de banda que se utilicen en las redes WAN y LAN mas se necesitará esta tecnología.

2.1 Factores que influyen en el presupuesto de enlace óptico

La atenuación en los dos modos de la fibra (monomodo y multimodo) generalmente es lineal respecto con la distancia. La cantidad de señal perdida debido a la atenuación del cable es por kilómetro multiplicado por la distancia a recorrer. Este presupuesto de enlace es la diferencia entre la potencia del transmisor y la sensibilidad del receptor.

La cantidad de potencia que tenemos que utilizar sobre el enlace y en los conectores es determinada por las características de los componentes que nosotros seleccionamos en los transmisores y receptores.

2.1.1 Presupuesto en pérdidas de los conectores y empalmes

La cantidad experimental de pérdida en un conector o en un empalme no es una cantidad fija o predecible. Nosotros conocemos que cantidad de pérdida es por lo regular para un cierto tipo de conector o un empalme de fibra en particular. El problema está en la medida de la pérdida en los empalmes o en los conectores lo cual varía considerablemente uno del otro, para estos casos afortunadamente la medición se toma como una distribución normal con respecto a la media. Hablando en la práctica las cantidades son un poco más complejas como a continuación:

- a. Para una conexión utilizando casi cualquier tipo de conector monomodo moderno donde ambos conectores son del mismo proveedor se puede esperar una pérdida promedio de 0.2 dB con una desviación estándar de 0.15 dB.
- b. Si los fabricantes de dos de los conectores son diferentes entonces lo que se espera una pérdida promedio de 0.35 dB con una desviación estándar de 0.25 dB.

Un conector simple podría tener un promedio de pérdida de 0.2 dB, pero en la práctica esta pérdida puede variar quizá entre 0.1 dB a 0.8 dB para cualquier caso. En el presupuesto de potencia para un enlace incluyendo múltiples conectores surge un problema bastante grande decidiendo que cantidad de pérdida se permitirá en el enlace. El promedio total de la pérdida en un enlace es el promedio de pérdida de un conector multiplicado por el número de conectores. Así, si tenemos 5 conectores en un enlace con un promedio de pérdida de 0.35 dB por conector entonces tenemos un promedio de pérdida total en el enlace de 1.75 dB.

2.2 Penalidades en el presupuesto de un enlace óptico

Existe un número de fenómenos que ocurren en un sistema de transmisión óptica y que esto puede incrementar el presupuesto de un enlace. Cantidad adicional inicial de potencia requerida para realizar un ajuste al presupuesto se le llama “potencia penalizada”.

En los equipos y sistemas más modernos que sufren de potencia penalizada, ya incluyen ajustes de sensibilidad en el receptor para reducir este inconveniente. Es bastante importante entender la magnitud de la penalización de potencia. Existen tres importantes características en los sistemas digitales que esta involucrado la penalización: sistema de ruido, efecto de dispersión y relación de extinción.

- Sistema de ruido

En este punto mencionaremos la relación señal a ruido (*Signal to Noise Ratio-SNR*) consiste en la calidad de cualquier señal recibida en un sistema de comunicaciones, la cual es determinada por la relación de la potencia de la señal con la potencia del ruido. La relación señal a ruido es una función en que una cantidad de ruido y la potencia de la señal. Cuando el ruido está incrementando en una señal es necesario compensar para que la relación señal a ruido a la salida pueda ser expresada como una cantidad de potencia que se incrementa en decibeles. En sistemas simples usualmente se ajusta la especificación de la sensibilidad del receptor para que pueda compensar el ruido que proviene del mismo receptor. En sistemas más complejos con amplificadores EDFA, de efecto Raman, etc. el ruido se vuelve importante para compensar el nivel de potencia planeado a través del sistema.

- Interferencia de intersímbolo

La dispersión en los bits causa que se conviertan en uno sobre un enlace. Cuando esto se vuelve crítico se previene estableciendo niveles bajos de gravedad ya que la dispersión agrega ruido a la señal. Podemos compensar esto incrementando el nivel de potencia de la señal y de este modo para ciertos niveles de dispersión se puede nominar el presupuesto de sistema de potencia el cual lo pueda compensar.

- Relación de extinción

Si un bit es representado por un nivel de potencia en el cual existe una ausencia completa de potencia y la diferencia entre los niveles de potencia de 1 bit y el de 0 bit es muy angosto. El nivel de potencia de 0 bit se convierte en ruido de fondo en cada 1 bit. El punto de decisión en el receptor tiene que ser alto para que la probabilidad de error no se incremente. Esto se puede compensar para que se incremente el nivel de potencia disponible en el receptor. El ratio de extinción de 10 dB incurre en una penalidad de potencia.

3. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL AMPLIFICADOR ÓPTICO EDFA

La llegada de los amplificadores ópticos han revolucionado las comunicaciones, éstos dispositivos amplifican la señal óptica directamente sin convertirla a electricidad ya que la luz misma es amplificada. En sistemas de comunicaciones ópticos no se tiene problema con ruido o con interferencia de la señal. Cuando la señal llega a su destino a través de una fibra de modo simple ésta se encuentra muy delimitada, pero para propósitos prácticos la señal no se cambia. Hay problemas con la dispersión pero hay otras razones convincentes para usar amplificadores ópticos como:

- *Fiabilidad de los amplificadores*

Cuando un repetidor es usado, la señal óptica debe de ser convertida a una forma eléctrica, luego pasa a través del repetidor y se convierte a una forma óptica de nuevo. El repetidor es complejo y sujeto a fallas.

- *Flexibilidad*

Un repetidor está especializado en velocidad, código, etc. de una señal en particular. Un amplificador amplifica cualquier señal por lo que no es sensible al código. Si se desea aumentar la velocidad o el formato de código de transmisión en un enlace existente amplificado, todo lo que hacemos es cambiar el transmisor y el receptor en los extremos del enlace.

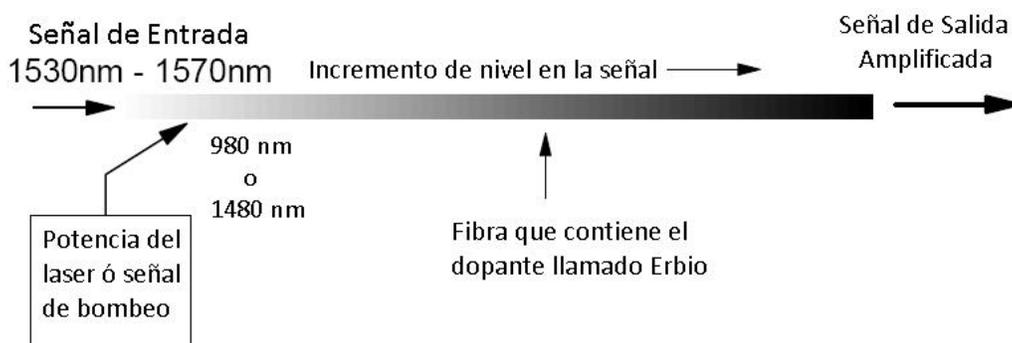
- *Multiplexación por división de longitud de onda (WDM)*

En los sistemas WDM usted tiene diferentes formas de dirección en una misma fibra. Para usar repetidores usted debería tener un demultiplexador óptico y entonces repetir cada señal individual. Los amplificadores únicamente amplifican todo lo que pasa por ellos no hay necesidad de demultiplexar.

- *Costo*

Los amplificadores ópticos son mucho más simples que los repetidores por lo cual deberían ser más baratos. Hay algunos posibles tipos de amplificadores ópticos los cuales pueden ser construidos con tecnología de semiconductor (como el láser), tecnología de guía de onda plana y en fibras. El amplificador óptico más importante es el amplificador de fibra dopado con Erblio, por su bajo costo, gran eficiencia y bajo ruido.

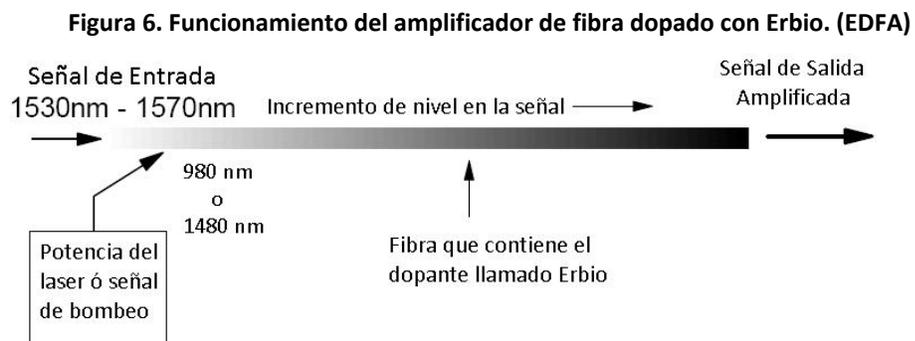
Figura 5. Función del amplificador de fibra dopado con Erblio. (EDFA)



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

3.1 Historia

Alrededor del año 1980 un grupo de investigadores de la Universidad de Southampton del Reino Unido tuvieron éxito en el desarrollo de un amplificador a base de fibra, el cual ahora está firmemente establecido, conocido como el medio el cual regenera la señal que proviene de grandes distancias. Este es el amplificador de fibra dopado con Erblio (EDFA) el cual se muestra su funcionamiento en la figura 6. La señal pasa a través de una pequeña longitud de una fibra especial y es amplificada por arriba de unas 1000 veces en lo que dura el viaje por la fibra. La señal jamás se convierte a eléctrica y tampoco deja la fibra.



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

3.2 Funcionamiento

Un amplificador de fibra dopado con Erblio consiste en una sección típicamente corta (10 metros más o menos) la sección de fibra pequeña que contiene el elemento de tierra rara donde el Erblio fue agregado al vidrio en la forma de ión (Er^{3+}), el cual es ilustrado en la figura 7.

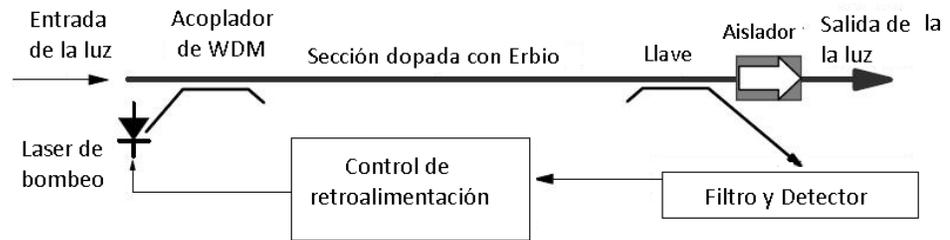
El principio básico del EDFA es ilustrado en la figura 6. La operación que se realiza en la figura 6 se explica a continuación:

1. Con una potencia relativamente alta el haz de luz es mezclado con la señal de entrada utilizando un acople de longitud selectiva.
2. El mezclador de luz es guiado dentro de una sección de fibra con iones de Erblio que se encuentran en el centro.
3. El potente haz de luz excita los iones de Erblio al estado más alto de energía.
4. Cuando los fotones pertenecen a la señal (a diferente longitud de onda de la luz de bombeo) se encuentran con los átomos de Erblio excitados, estos átomos de Erblio donan un poco de energía a la señal y retornan a su estado de energía más bajo.

Este proceso no ocurre para todas las longitudes de onda de la señal de la luz. Existe un rango de amplificación de longitudes de onda de aproximadamente 24 nm de ancho.

5. Un punto importante para el Erblio es de que aporta energía en forma de fotones los cuales están en fase y en la misma dirección que la señal que es amplificada, por lo que la señal es amplificada a lo largo del viaje solamente. Hay muchos posibles escenarios para operar pero el mejor rango es cuando el bombeo con luz en la cual la longitud de onda es 980 nm.
6. Un punto importante para el Erblio es que solamente absorbe luz (y salta al siguiente estado de energía). Si la luz esta entre el rango de 1525 nm y 1570 nm la luz excitará el Erblio y la señal será amplificada.

Figura 7. Erbium Doped Optical Fibre Amplifier



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

El principio utilizado aquí es el principio del láser, el cual consiste en que los iones de Erbio son capaces de subsistir en muchos estados de energía. Cuando un ión de Erbio se encuentra en el estado más alto de energía, un fotón de luz estimulará para que dé un poco de energía y regrese a su estado más bajo de energía (estado mas estable), esto es llamado emisión estimulada.

Para hacer que este principio funcione, se necesita una forma de llevar los átomos de Erbio al estado de excitación. El diodo láser que aparece en la Figura 7 genera un potente haz de luz (10 y 200 miliwatts) en una longitud de onda tal que los iones de Erbio serán absorbidos y saltarán al estado de excitación.

En resumen el dispositivo trabaja de esta manera. Un haz de luz constante (llamado de bombeo) en la longitud de onda correcta para excitar a los átomos de Erbio son mezclados con la señal de entrada hasta asociar una longitud de onda específica.

3.3 Características técnicas

Los iones del Erblio pueden ser excitados en un específico número de frecuencias tales como 514, 532, 667, 800, 980 y 1480 nm. A continuación se enumeran algunas características técnicas de los EDFAs.

1. Bombeo eficiente.
2. Mínima sensibilidad de polarización.
3. Baja pérdida de inserción.
4. Alta potencia de salida.
5. Bajo ruido.
6. Alta sensibilidad.
7. Baja distorsión y mínimo traslape de canales.

Las medidas cuantitativas del amplificador son las siguientes:

Ganancia (amplificador)

Esta es la relación en decibeles de la potencia de entrada y la potencia de salida.

Coefficiente de ganancia

El coeficiente de ganancia es un indicador muy útil para la eficiencia del amplificador. Esta definido como una ganancia de señal pequeña dividido por la potencia del bombeo.

Ancho de banda

Este es el rango de las longitudes de onda sobre el cual el amplificador funciona.

Ganancia de saturación

Este es el punto donde el aumento de la potencia de entrada deja de pasar y como resultado empieza a incrementarse la potencia de salida. Los EDFAs son muy diferentes a los amplificadores eléctricos en este aspecto. Cuando la ganancia de saturación ha alcanzado la de un amplificador eléctrico generalmente es indeseable ya que como resultado hay distorsión y traslape de canales. Cuando los EDFAs están saturados sobre la ganancia promedio del amplificador empieza a reducir pero esto no distorsiona la señal. Usualmente el EDFA funciona con ganancia de saturación.

Sensibilidad de polarización

Hay muy poca sensibilidad a la polarización en los estados de un EDFA, ésta es una de las ventajas. La sensibilidad de polarización es la diferencia en ganancia de la entrada de señal en una polarización a la ganancia en la polarización ortogonal. Un valor típico sería entre 0.01 a 0.1 dB.

Ruido

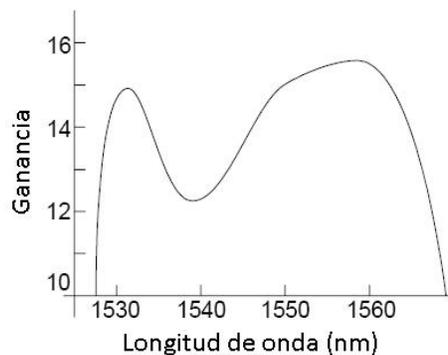
Los EDFAs pueden añadir ruido a una señal, principalmente como resultado de la emisión espontánea amplificada (Amplified Spontaneous Emission). La figura de ruido de un amplificador se expresa en decibelios y se define como la relación de la señal a ruido (Signal to Noise Ratio) de entrada y la relación señal a ruido (SNR) a la salida.

$$Noise = \frac{SNR_{input}}{SNR_{output}}$$

3.4 Características de ganancia

La figura 8 muestra la curva típica de ganancia de un EDFA. Se puede notar que la escala en el eje "Y" es en dB y es logarítmica. También el origen no es cero, la ganancia a 1560 nm es 3 dB mayor que la ganancia en 1540 nm. En sistemas de WDM utiliza muchas longitudes de onda dentro de la banda de amplificación. Si tenemos un enlace bastante largo utilizando varios amplificadores (2000 ó 3000 km con más o menos 80 amplificadores) la diferencia en respuesta de varios canales se estará agregando. Esta diferencia en respuesta de varios canales puede llegar a 100 dB.

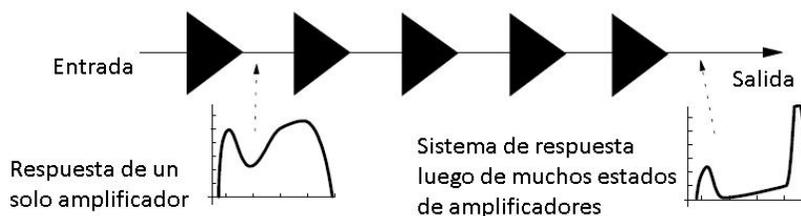
Figura 8. Curva de ganancia típica de un EDFA.



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

Algunos canales serán dominantes mientras que otros se perderán con el ruido debido al (ASE). Esto es tan perjudicial para la operación de un sistema con amplificadores EDFA, que es menor el daño si la relación señal a ruido (SNR) varía significativamente de un canal a otro. El sistema es bueno con el canal que peor respuesta tenga, ya que en este tipo de sistema se necesita que cada canal tenga la misma ganancia, esto es que la ganancia de los amplificadores deberían mantenerse en el rango plano de la respuesta (ver figura 8) del amplificador para las longitudes de onda.

Figura 9. Respuesta en cascada de los EDFAs.



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

Existen técnicas en las cuales se puede trabajar en la parte plana de la curva de ganancia. Estas pueden ser:

1. Operando el dispositivo a 77° K. Esto produce una gran parte plana en la curva de ganancia pero esto no es práctico.
2. Si se introduce otro material dopante (como el aluminio y el ytterbium) con el Erblio en el núcleo de la fibra. Dependiendo del material utilizado esto puede alterar la respuesta del amplificador. Además se podría colocar una serie de diferentes co-dopantes en secciones a lo largo de la fibra del amplificador.
3. La longitud del amplificador es otro factor influyente en la parte plana (flatness) de la curva de ganancia.
4. Controlando la potencia del bombeo a través de la retroalimentación podría reducir el ASE (Amplified Spontaneous Emission). Esta técnica reduce la respuesta no lineal en la variación de la señal de entrada.
5. Agregando un canal extra WDM localmente al amplificador, la potencia en este circuito contiene el exceso de potencia y por lo tanto reduce las variaciones no lineales del nivel de potencia. Esto es llamado "gain clamping".

6. Manipulando la forma de la guía de onda de la fibra dentro del amplificador. La fibra con doble núcleo recientemente ha sido mostrada con la característica de producir una ganancia plana (flatness).

A nivel de sistema hay otras modificaciones que pueden compensar a las técnicas descritas anteriormente, estos son:

1. Utilizar la fibra conocida como "*fibre Bragg gratings*" como filtro para reducir los picos en la respuesta de la ganancia. Es decir, esto reduce la respuesta para todas las longitudes de onda a la respuesta de la peor longitud de onda. Esto ya fue realizado en pruebas de campo y fueron bastante exitosas dichas pruebas.
2. Utilizar un canal distinto para las señales que son transmitidas, ya que transmitiendo en diferentes canales WDM a diferentes niveles de potencia se puede compensar las características de la ganancia del amplificador.

3.5 Segunda ventana de ganancia

La ventana de ganancia usual para los EDFAs es de alrededor 1525-1565 nm. Con un amplificador bien diseñado es posible obtener otra ventana de ganancia actualmente esta en 1570-1610 nm.

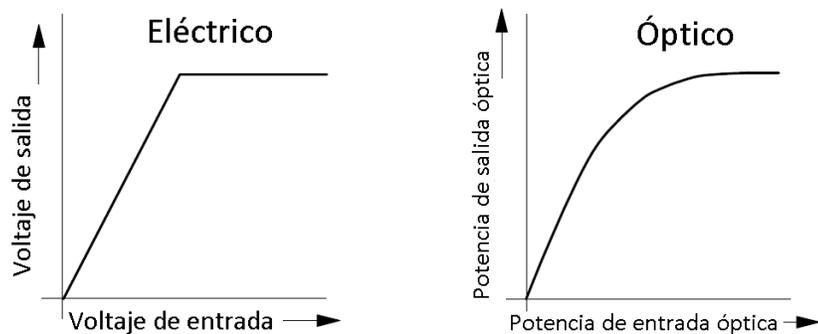
Utilizando co-dopantes, principalmente aluminio y fósforo, se puede obtener una aceptable ganancia entre 1570 y 1610 nm. Esto a veces es llamado "la segunda ventana de ganancia". No importe lo que se haga la ganancia entre 1530 y 1560 nm aún será significativamente mayor que las demás longitudes de onda. Así que para utilizar la segunda ventana de ganancia no se debe permitir poner ninguna señal en la primera ventana de ganancia.

El ancho de banda de los EDFAs es alrededor de los 80 nm. La técnica utilizada para dividir las señales de entrada es alrededor de 1567 nm. Las longitudes de onda corta son enrutadas a una sección convencional del EDFA, a lo largo de esta sección es optimizada para la amplificación en la segunda ventana. Luego las dos señales son combinadas de nuevo.

3.6 Ganancia de saturación

Cuando la potencia de entrada del amplificador es incrementada siempre habrá un punto donde la ganancia se satura. Aunque la potencia de entrada es incrementada la salida se mantiene constante (ver figura 10).

Figura 10. Comportamiento de un EDFA en saturación de ganancia.



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

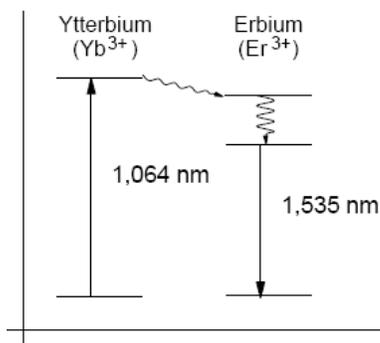
Hay dos formas distintas entre el comportamiento de los amplificadores electrónicos y los EDFAs en ganancia de saturación. Resulta del hecho que el Erblio tiene largo tiempo de estado alto, la ganancia de un amplificador de Erblio responde a los cambios potencia promedio (fluctuaciones de potencia en pocos milisegundos). Los amplificadores electrónicos responden instantáneamente a los cambios de niveles de potencia.

1. Cuando la potencia de entrada se incremento en un EDFA la ganancia total del amplificador decrementa lentamente. En un amplificador electrónico opera linealmente hasta la ganancia de saturación y todo lo que pueda proporcionar el amplificador. Esto significa que un amplificador electrónico opera cerca de la saturación y lo cual introduce una distorsión significativa a la señal.
2. Un amplificador de Erblio en saturación simplemente aplica menos ganancia a pesar que en la entrada hay un nivel instantáneo de la señal lo cual no distorsiona la señal. Existe un mínimo traslape entre los canales de WDM en saturación.

3.7 Co-dopantes

Como se mencionó anteriormente se puede cambiar muchas de las características de un EDFA por co-dopaje de la fibra con otro elemento. Los efectos son bastantes complejos y no es simplemente una adición de las características de los dos elementos dopantes.

Figura 11. Niveles de energía del amplificador co-dopado de Erblio/Ytterbio.



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

Comúnmente los co-dopantes utilizados son el aluminio (Al), ytterbio (Yb) y el germanio (Ge). Y estas modificaciones afectan el espectro de la ganancia del amplificador. Por ejemplo si se dopa con el Ge produce dos picos de ganancia sobre el espectro, uno en 1536 nm y el otro a 1550 nm. Se aplana y ensancha la ganancia en el espectro en el rango de 1540 nm a 1560 nm.

3.8 Longitud del amplificador

Como la señal viaja a lo largo del amplificador se vuelve más robusta por la amplificación. Ya que la potencia de bombeo viaja a través del amplificador el nivel decrece debido a la absorción. Por lo cual ambas señales, el nivel de potencia de la señal y el nivel de potencia del bombeo varían a lo largo del amplificador. En cualquier punto nosotros tenemos un número finito de iones de Erbium y por lo tanto solo se puede realizar una ganancia finita (máximo de potencia finita) por unidad de longitud del amplificador. Por supuesto que esto se ve afectado en la concentración de iones de Erbium y el radio del centro.

Un amplificador diseñado para operar con longitudes de onda simple, la óptima longitud de este amplificador es en función de la potencia de la señal, potencia del bombeo, la concentración de iones de Erbium y la cantidad de ganancia requerida.

3.9 Longitud de onda de la señal de bombeo

Anteriormente se menciona que el Erblio que se dopa con el Silicio puede ser utilizado con una señal de bombeo a 980 nm o 1480 nm. Si un elemento es dopado con el Erblio (co-dopante) por ejemplo el ytterbio (Yb) la longitud de onda del bombeo puede ser a 1064 nm, ya que es mínima la diferencia de las características del amplificador porque se depende del bombeo.

- El espectro de la ganancia del amplificador depende en parte de la longitud de onda de bombeo, no es tan marcada la diferencia.
- En 980 nm la longitud de onda del bombeo es por lo menos el doble de eficiente como en 1480 nm. Esto en parte porque los 1480 nm están dentro del espectro de la ganancia del amplificador y algunos fotones del bombeo son estimulados y el amplificador ligeramente los absorbe. Esto no presenta un gran problema como el resultado de los fotones que probablemente serán absorbidos ellos mismos pero esto implica que disminuirá la eficiencia del amplificador.
- Otro factor es que cuando se bombea a 1480 nm se tiene dos niveles de sistema láser y si se requiere más energía para obtener y mantener tal inversión como que fuese tres niveles del sistema de operación a 980 nm. Los amplificadores que están trabajando con esta longitud de onda son insensibles a los cambios de temperatura, en cambio los amplificadores que trabajan con longitud de onda de bombeo a 1480 nm se ven afectados significativamente con los cambios de temperatura y esto se refleja en la curva de ganancia del amplificador.

- Una desventaja de bombear a 980 nm el ancho de banda de la longitud de onda del bombeo para la cual el Erbio pueda responder es bastante angosta. Se necesita tener el control de la longitud de onda del bombeo dentro del rango de transferencia de potencia óptima, en cambio si se trabaja en 1480 nm no tiene esta desventaja.
- En un principio el láser a 980 nm no estaban muy disponibles como los de 1480 nm. Por eso los operadores primero utilizaron láser en 1480 nm especialmente en enlaces submarinos.

Construir un buen láser semiconductor para bombeo es bastante considerable reto. El bombeo necesita producir una salida por arriba de 250 mW, a este nivel de concentración de potencia ya en producción en el campo y que se utilice en una fibra monomodo representa una alta concentración de energía. Esto significa un problema con la intensidad de la potencia concentrada en la salida del láser de bombeo, hasta que se diseñe una manera para proteger a las personas que manipulan equipos de este tipo.

3.10 Dirección del bombeo

Mientras que los dispositivos EDFA poseen muy bajo ruido aun crean un poco de ruido en forma de ASE (*Amplified Spontaneous Emission*). Esto no es un gran problema en unos pocos estados del amplificador pero hay muchos estados entonces el problema se vuelve significativo.

No siempre vamos a tener el bombeo en la misma dirección de la señal ya que se puede usar diferentes longitudes de onda para bombear. Como por ejemplo, si nosotros tenemos una señal de nivel bajo, el bombeo que proviene del final de la señal de entrada podría resultar en mucha potencia de bombeo para la señal de entrada. (No hay suficiente señal para usar en la potencia de bombeo). Si esto sucede el Erblio al final de la señal de entrada se sometería a mucha emisión espontánea y tendríamos ruido del ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) lo cual se desperdiciaría mucha potencia de bombeo. Si este es el caso lo que se debería hacer es bombear al final de la otra señal (señal de salida) del amplificador para no utilizar mucha potencia.

3.11 Revestimiento del bombeo

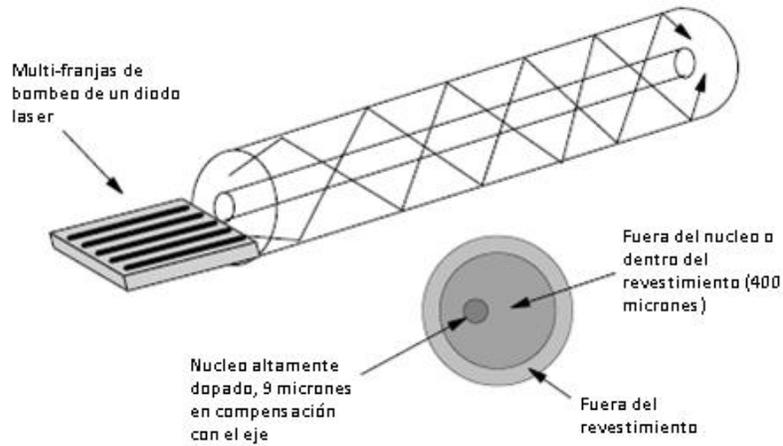
Aparentemente el camino más corto para introducir la luz del bombeo en el centro (*core*) de la fibra es a través del revestimiento (*cladding*). Es por ello que no se debe ajustar el acople de la luz de bombeo dentro del revestimiento, y dejar que sea absorbido cuando viaje en el centro. Lamentablemente no es tan simple, la luz de bombeo si es introducida dentro del revestimiento podría propagarse en muchos modos (cientos) y se convertiría en una fibra multimodo, pero el 90% de estos modos nunca transita en el centro así nunca podría ser absorbida. Se ha realizado muchas investigaciones respecto al bombeo a través del revestimiento de los EDFA, esto compromete a utilizar un perfil especial de fibra el cual consiste en otros modos de revestimiento para el centro. Lo justo es utilizar fibra que tenga algún tipo de compensación en el centro.

Una gran atracción del bombeo de esta forma es que permite niveles de potencia bastantes altos. No se puede bombear a un nivel muy de potencia muy alto dentro del centro porque la no linealidad en la respuesta de la fibra causa distorsión en la señal. La sección de cruce en el revestimiento es mucho mas larga que la potencia promedio que se pueda guardar mientras que el total de la potencia puede ser relativamente alta.

Por lo regular los diodos laser no pueden producir varios niveles altos de potencia de bombeo. Muchas pruebas se han hecho utilizando diodos láser (*multi-stripes*). Estos realmente son múltiples láser situados muy cerca unos con otros en el mismo chip. Un problema es conectar la salida del laser a la entrada de la fibra.

La configuración mostrada en la figura 9 usa un revestimiento de 400 micras de diámetro por lo que la potencia de los láser multi-franja pueden ser acoplados a la fibra. Es un poco inadecuado llamar revestimiento, realmente es una guía de onda para la potencia de bombeo (*sourrounding*) circundante en el centro de la fibra. Este cerco (*sourrounding*) es llamado así al interior del revestimiento, ósea que es otra capa de revestimiento. Ambos amplificadores y láser pueden realizarse usando técnicas y dispositivos que han sido descritos con una salida de potencia arriba de los 10 watts.

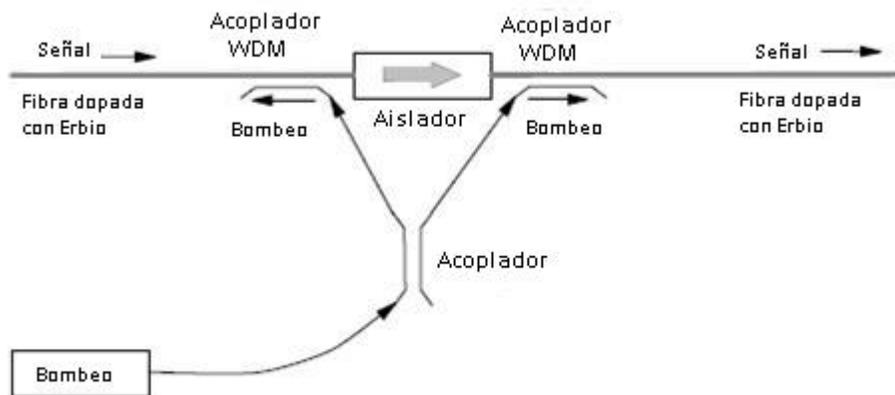
Figura 12. Configuración del revestimiento del bombeo.



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

3.12 Multifase de los EDFAs

Figura 13. Dos Fases de los Amplificadores EDFA con bombeo compartido.



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

Algunos diseños de EDFA concatenan dos o en impares de amplificadores de fase (*stage*). Un amplificador de fase es considerado para cualquier sección irrompible de la fibra dopada de Erbio. Las multifases de los amplificadores son hechos por las siguientes razones:

1. Incrementar la potencia de salida aunque retiene poco ruido.
2. Aplanar la respuesta total de la ganancia del amplificador.
3. Reducir el ruido ASE (*Amplified Spontaneous Emisión*).

Los EDFA's con diferentes co-dopantes tiene diferentes curvas de ganancia, estas curvas se pueden buscar para el caso en que la respuesta a través de toda la ventana sea plana, el total de la ganancia reportada para esta configuración de amplificadores es de 50 dB.

El ruido ASE (*Amplified Spontaneous Emisión*) en un amplificador puede ser reducido (más o menos 6 dB) siendo reemplazado por un aislador sin ganancia de sección, ya que esto previene que el contador de propagación ASE de la saturación de ganancia en la entrada se incremente.

3.13 Ruido en EDFAs

En cualquier sistema donde exista ganancia también esta presente el ruido, la fuente predominante de ruido en los amplificadores EDFA es la Emisión Espontanea Amplificada o ASE (*Amplified Spontaneous Emission*). Un fotón es emitido con una fase y dirección aleatoria. Una muy pequeña proporción de fotones emitidos estarán en la misma dirección de la señal en la fibra y los cuales serán capturados. Estos fotones son indistinguibles de la señal (desde el punto de vista de un amplificador) por lo cual son amplificados. ASE se produce sobre el rango de longitudes de onda que corresponden exactamente al espectro de la ganancia del amplificador. Siendo así la potencia de ASE se propaga sobre otras longitudes de onda de la señal y ya no puede ser filtradas.

En muchos sistemas ASE es trivial y no constituye un problema, sin embargo para enlaces largos con muchos estados de amplificadores, ASE se convierte en un fenómeno limitante para dicho enlace, por dos razones:

- El ruido es agregado a los canales de la señal.
- El efecto en la ganancia de un amplificador significa una cantidad considerable de ASE viajando con la señal.

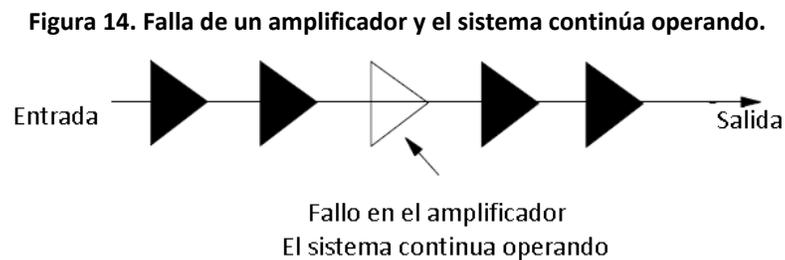
Existen algunas recomendaciones para evitar este fenómeno:

- Diseñar con mucho cuidado el control de la emisión espontánea del amplificador. La técnica más utilizada es la de tener un amplificador en modo de saturación por lo que este exceso de potencia en el bombeo no terminará convirtiéndose en ASE.
- Colocar filtros dentro del amplificador o tener un filtro en el enlace para que no permita el paso de las longitudes de onda para el inicio de la transmisión ya que ASE es bastante fuerte a 1533 nm.
- Colocar aisladores entre las diferentes fases del amplificador para prevenir la propagación de ASE regrese a donde se genera el bombeo.

Es importante mencionar que el ruido en los amplificadores EDFA es proporcional a la ganancia de dicho amplificador. Esto quiere decir que cuando el amplificador incrementa la señal de entrada a un sistema también incrementa cualquier tipo de ruido que se haya recibido.

3.14 Sistema de salto

Una característica de los EDFAs es que cuando están en multifase y uno de estos falla (por cualquier circunstancia) la señal pasa a través del amplificador dañado que relativamente no se puede cambiar en ese momento (existe un poco de atenuación pero es mínima). Una forma de colocar múltiples amplificadores independientes en cascada divididos por secciones, en la cual si una sección falla la otra sección pueden recibir la carga. Mientras que en los repetidores eléctricos si falla un bloque en el sistema se interrumpe la comunicación.



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

4. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL AMPLIFICADOR ÓPTICO DE EFECTO RAMAN

Estos amplificadores utilizan el principio de la difusión estimulada Raman o en inglés llamado "*Stimulated Raman Scattering*" (SRS) y es ampliamente investigada desde finales de los ochenta, pero el interés decayó luego de que surgieron los amplificadores EDFA. Los amplificadores Raman son muy efectivos pero tienen un gran problema y es que no hay láser de bajo costo de una longitud de onda apropiada. El interés por estos amplificadores resurgió por el año 1997, debido a innovaciones en diseño de la rejilla de fibra de Bragg o en inglés llamado "*Fiber Bragg Grating*" (FBG).

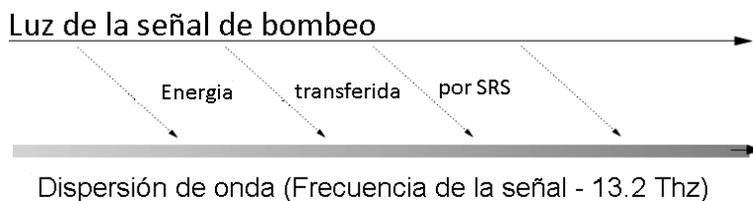
El SRS provoca una nueva señal (forma de Stokes) para ser generado en la misma dirección como la onda de bombeo desplazada hacia abajo en una frecuencia de 13.2 THz proporcionado por la energía suficiente para la señal de bombeo. Adicionalmente a esto la dispersión estimulada de Raman o SRS (*Stimulated Raman Scattering*) causa que la amplificación de la señal sea mas baja en frecuencia que la señal de bombeo. Una optima amplificación ocurre cuando la diferencia entre las longitudes de onda es alrededor de 13.2 THz (aproximadamente 60 nm en la banda 1310 nm). La señal al ser amplificada debe ser baja en frecuencia que la de bombeo. En fibra regular dopada con Germanio (*GE-doped*) el efecto es muy pequeño y toma una longitud relativamente larga de fibra para un efecto de aumento significativo.

El principio es relativamente fácil para construir un amplificador Raman, todo lo que hay que hacer es tomar una larga sección de fibra (aproximadamente 1 km) y acoplarla a una señal y bombear alrededor de los 13.2 Thz o superior, más la frecuencia de la señal. Un dispositivo sencillo tal como esto nos proporciona bastante bien la amplificación de la señal.

Existe un gran problema, aunque el bombeo y la señal no necesita estar separada exactamente por un cambio cercano Raman obtenemos un amplificador más eficiente. Pero nosotros no podemos diseñar o construir (alrededor de medio o mas watts de potencia) el láser de bombeo en cualquier longitud de onda que quisiéramos, las longitudes de onda de los láser son muy específicas y los de alta potencia son bastante difíciles de construir.

4.1 Cambio de longitud de onda utilizando SRS

Figura 15. Cambio de longitud de onda utilizando SRS.



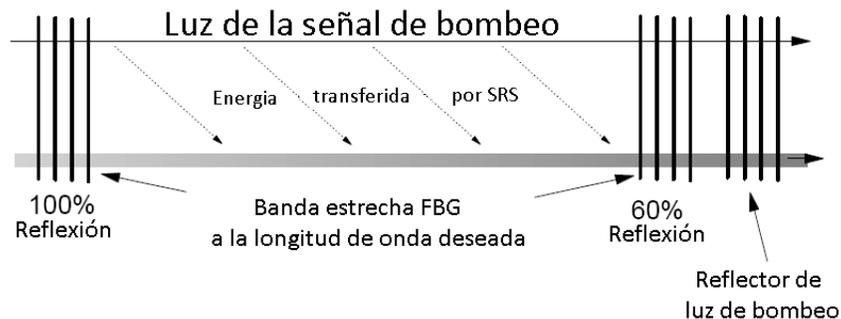
Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

Una solución al problema de encontrar un bombeo de la longitud de onda correcta, es un cambio de la longitud de onda en un bombeo en el cual nosotros podamos obtener una apropiada longitud de onda.

En la figura 15 muestra el principio del cambio de bombeo hacia abajo producido por el cambio Raman. Una alto nivel de potencia cambia la luz debido al SRS a otra longitud de onda (más baja y de la forma de onda de Stokes).

Entonces este cambio de luz es amplificado por SRS. La transferencia de potencia continua progresivamente a la señal de onda (forma de Stokes). En una fibra normal dopada de Germanio este efecto es bastante pequeño, adicionalmente el cambio producido en la longitud de onda hace que se incremente el ancho de banda de las longitudes de onda cuando nosotros necesitamos un cambio angosto en la señal.

Figura 16. Cambiador de longitud de onda utilizando FBGs.

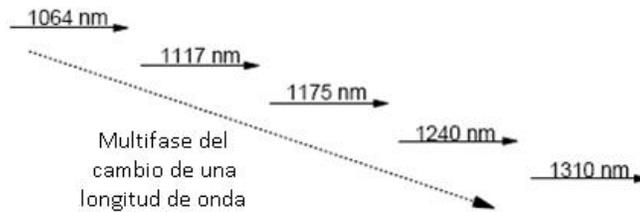


Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

El efecto puede ser significativamente mejorado utilizando la configuración como es ilustrada en la figura 16. Aquí nosotros insertamos una banda angosta FBGs para enfocarse en el cambio de luz. El SRS sucede en ambas direcciones por lo tanto el cambio de luz será reflejado entre la FBGs y otra luz que saldrá del dispositivo. La eficiencia es mejorada agregando un reflector FBG para la longitud de onda del bombeo. Esto es una muestra de lo que sucede en un láser, pero por supuesto que no es un láser porque no está ocurriendo una emisión estimulada.

Si esto es correcto la longitud de onda cambiará pudiendo ser bastante eficiente la conversión de más luz a la nueva longitud de onda.

Figura 17. Múltiples estados de las longitudes de onda.



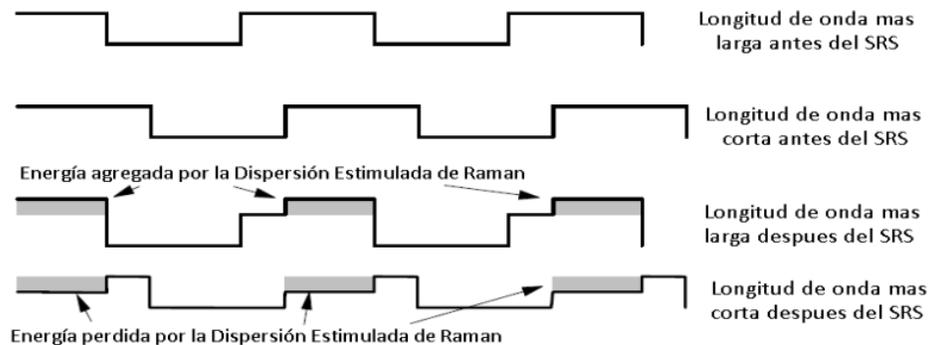
Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

Si vemos mas cambios de luz en una nueva longitud de onda, entonces nosotros podemos cambiar la longitud de onda de nuevo dado los cambios de luz. Estos cambios se dan en cascada en muchos estados con lo cual se incrementa conforme se avanza. En la figura 17 los múltiples estados son mostrados desde la longitud de onda de bombeo a 1064 nm a 1310 nm.

4.2 Dispersión estimulada de Raman (SRS)

También llamado por sus siglas en inglés como *Stimulated Raman Scattering* (SRS), es causado por un mecanismo similar a lo que produce dispersión estimulada de Brillouin o en ingles llamado *Stimulated Brillouin Scattering* (SBS). Las interacciones involucradas son debido a vibraciones acústicas moleculares, la dispersión de la luz puede aparecer en ambas direcciones (hacia delante y hacia atrás). En un sistema de un canal el “Umbral de Raman” (es el nivel de potencia en la cual la dispersión Raman empieza a tomar efecto) es bastante alto. Otros efectos (como la SBS) limita la potencia de la señal por mucho a comparación del Umbral de Raman en sistemas simples de un canal.

Figura 18. Dispersión Estimulada de Raman.



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

Mientras que la dispersión estimulada de Raman (SRS) o llamada también *Stimulated Raman Scattering* no es un inconveniente en los sistemas de un canal, pero si puede ser un problema significativo en los sistemas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Cuando tenemos múltiples canales, la energía o potencia es transferida de las longitudes de onda cortas hacia las largas. Este efecto puede ser beneficioso si tan solo fuese posible construir un amplificador óptico basado en SRS. Lamentablemente en la transmisión el sistema es una fuente de ruido.

En la figura 18 muestra el principio, dos longitudes de onda son mostradas antes y después del SRS. Se puede notar que la potencia ha sido transferida de la longitud de onda corta a la larga (de la onda de energía más elevada a la más baja). Esto es el resultado de que se agrega ruido a la longitud de onda larga y se resta ruido a la longitud de onda corta.

Esta potencia transferida es causada por las interacciones de la luz con vibraciones de las moléculas, la potencia óptica transferida es llamada "Onda de Stokes".

Las características importantes de la dispersión estimulada de Raman (SRS) son:

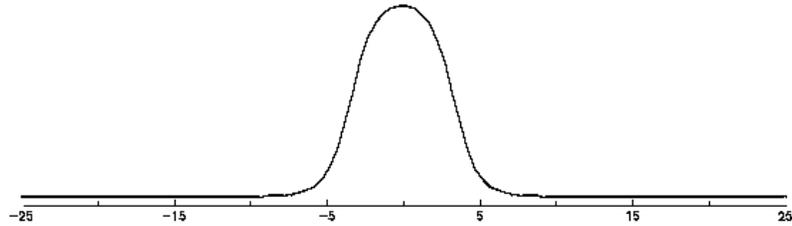
- El efecto de SRS viene a ser más grande cuando las señales cuando son movilizadas más adelante (siempre dentro de algunos límites). Esto es un problema cuando nosotros queremos separar las señales para evitar la mezcla de las cuatro ondas y es cuando obtenemos el SRS. Este efecto puede notar alrededor de los 40 THz (en un rango bastante ancho). Y puede ser maximizado cuando dos frecuencias están separadas y son de 13.2 THz.
- SRS incrementa exponencialmente cuando se incrementa la potencia, un nivel muy elevado de energía es posible para todas las señales para que lo transfieran a la onda de Stokes.

En pruebas de campo se ha llegado a determinar que en un sistema de diez canales de WDM con 1 nm de espacio entre canales, se necesita que los niveles de potencia sean mantenidos por debajo de 3mW por canal si es que se quiere mantener bajo el SRS.

4.3 Dispersión estimulada de Brillouin (SBS)

También conocido por sus inglés *Stimulated Brillouin Scattering* (SBS), es la dispersión de la luz hacia atrás “o de regreso” al transmisor causado por vibraciones mecánicas (acústicas) en el medio de transmisión (fibra). La onda reflectada producida es llamada “Onda de Stokes”. Este efecto es usualmente trivial pero puede ser bastante importante en situaciones en donde la alta calidad, el ancho de la línea del láser es angosto y es utilizado con un nivel de potencia relativamente alto.

Figura 19. Onda de Stokes.

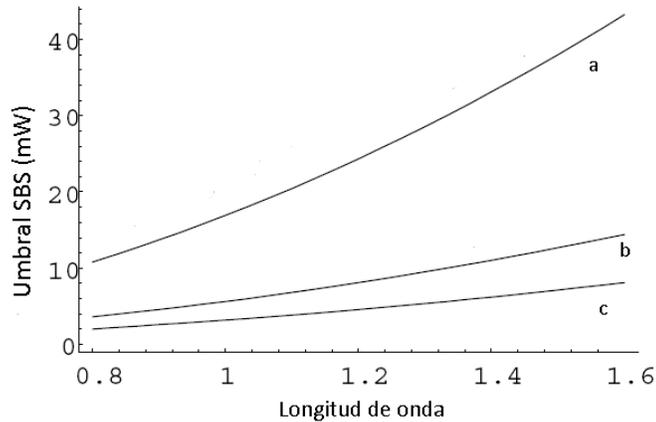


Fuente: <http://www.maths.leeds.ac.uk/~grant/es/temas.html>

La dispersión estimulada de Brillouin es causada por la presencia de la misma señal óptica. Aunque el nivel de la señal sea de unos cuantos miliwatts a simple vista es bastante pequeña, en el cruce de sección del núcleo de una fibra monomodo el campo puede ser intenso. Una señal óptica es en realidad un campo electromagnético bastante fuerte. Este campo causa vibraciones mecánicas en la fibra el cual tiene un patrón variable y diferencias muy pequeñas en el índice de refracción. El efecto de dispersión (Scattering) es causado porque la luz en principio es reflejada por la difracción de las rejillas creada por el patrón normal de cambios del índice de refracción. La luz reflejada es enviada de vuelta a las rejillas. El cambio de la onda reflejada en la fibra monomodo desciende en frecuencia alrededor de los 11.1 GHz.

El efecto como en la dispersión estimulada de Raman (SRS) no es lineal y en sistemas prácticos requiere de un nivel de energía de alrededor de 3 mW para cualquier efecto considerable y observable, esto requiere de una larga interacción y el ancho de la línea del láser es angosto. En general el ancho de la línea es angosto y debe ser menor que 100 MHz (alrededor de 0.1 nm) para SBS se convierta en un inconveniente. El efecto de reenviar en la dirección ayuda en que se incremente la atenuación, esto es rápido pero puede que agregue ruido a la señal.

Figura 20, Umbral de SBS versus longitud de onda (μm).



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

a \rightarrow núcleo = 8 micras, ancho de banda = 300 MHz

b \rightarrow núcleo = 8 micras, ancho de banda = 100 MHz

c \rightarrow núcleo = 6 micras, ancho de banda = 100 MHz

Muchos sistemas actuales de SBS no tienen problemas por las siguientes razones:

1. Modulación directa en la transmisión del láser el cual produce que la señal se incremente en ancho y chirp.
2. El efecto es menor en sistemas de 1300 nm que en 1550 nm. Debido a la alta atenuación de la fibra.
3. Los láser son capaces de producir el nivel de potencia necesario para tenerlo disponible y los amplificadores son una innovación reciente.
4. A velocidades por debajo de 2.4 GHz no es necesario utilizar una alta potencia o láser con una angosta ancho de línea.
5. Los efectos SBS decrecen con el incremento en velocidad porque la señal incrementa su ancho por los efectos de la modulación.

La dispersión estimulada de Brillouin (SBS) puede ser un problema mayor en tres situaciones:

1. Para sistemas de distancias largas donde el espacio entre amplificadores es grande y donde la tasa de bits es baja (por debajo de 205 Gbps).
2. En sistemas WDM (por arriba de 10 Gbps) el ancho de la señal en el espectro de frecuencias es muy angosto.
3. Para el bombeo remoto de un amplificador óptico dopado con Erblio a través de una fibra separada. El bombeo EDFA típicamente coloca afuera sobre cuatro líneas con una frecuencia de 80 MHz, pero se ven limitadas por SBS en la cantidad de potencia que puede ser utilizada. Esto limita significativamente la potencia del bombeo remoto.

4.3.1 Chirp

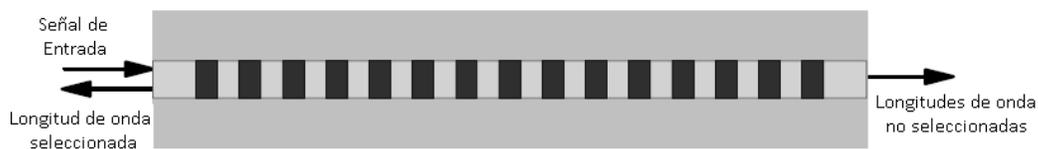
Consiste en variaciones de la corriente de bombeo, las cuales implican cambios de la longitud de onda, es lo que se conoce como chirp en frecuencia. Sus efectos son:

- a. Al aumentar la corriente de polarización, se produce desplazamiento a derechas de la λ e emisión.
- b. La diferencia entre modos laterales se hace cada vez mayor, es decir cuando la corriente aumenta, el espectro disminuye.
- c. Varía la frecuencia óptica de emisión del láser.

4.4 Rejilla de fibra de BRAGG

La rejilla de fibra de Bragg también conocido en ingles como *Fibre Bragg Gratings* (FBGs), El invento de esta fibra es nominada unos de los grandes inventos de la historia de la comunicación más espectacular incluso más que la invención del láser. La FBG es bastante simple, de bajo costo y es un filtro selectivo de longitud de onda. Posee un rango amplio de aplicaciones que mejoran la calidad y reducen el costo de la red óptica.

Figura 21. Esquema Rejilla de Fibra de Bragg.



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

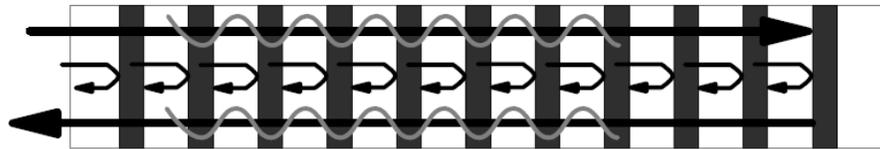
La rejilla de fibra de Bragg es una pieza ordinaria de unos cuantos centímetros de longitud en una fibra monomodo. La rejilla es construida por una variación en el índice de refracción del núcleo a lo largo de la fibra. La luz a una específica longitud de onda viaja a través de la fibra y es reflejada de vuelta de la rejilla en dirección de donde vino. Las longitudes de onda las cuales no son seleccionadas pasan a través de una atenuación.

La característica más importante de FBG es que las longitudes de onda resonantes las refleja hacia la fuente de vuelta y las longitudes de onda no resonantes son transmitidas a través del dispositivo sin pérdida. La figura 21 muestra la forma esquemática del dispositivo, la rejilla esta dibujada a lo largo de la longitud del núcleo de la fibra. La luz entra por la parte izquierda del dibujo y es reflejada las longitudes de onda a excepción de la longitud de onda seleccionada.

La rejilla consiste en un conjunto de variaciones en el índice de refracción longitudinal del núcleo de la fibra. Sorprendentemente no se necesita gran variación en el índice de refracción para producir una aceptable rejilla.

4.4.1 Principio de operación

Figura 22. Principio de operación de la rejilla de fibra de Bragg.



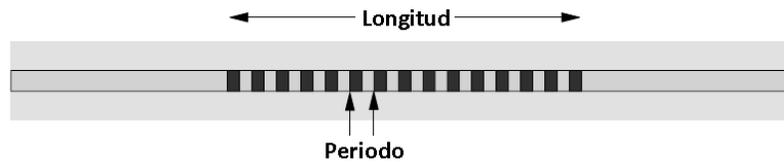
Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

El principio del FBG es ilustrado de la imagen anterior. La luz se mueve a lo largo de la fibra y se encuentra con los cambios en el índice de refracción del núcleo de la fibra y una pequeña cantidad de luz es reflejada en cada. Cuando el período de la rejilla y la longitud de onda de la luz son la misma entonces la potencia es acoplada desde la dirección delantera hacia atrás. La luz de otras longitudes de onda encuentra interferencia de las reflexiones fuera de fase y por consiguiente no puede propagarse.

Para las longitudes de onda que no son seleccionadas y son reflejadas pero son destruidas por ellas mismas, como y porque estas longitudes de onda pasan a través de la rejilla con una pérdida muy pequeña. Si nosotros pensamos como que es una onda electromagnética, entonces el efecto es bastante entendible. Lo que realmente sucede es que en la rejilla se forma un circuito resonante electromagnético, la potencia que proviene de la dirección delantera es acoplada al circuito resonante y por lo tanto se refleja de vuelta. Las longitudes de onda no resonantes son bastantes afectadas.

4.4.2 Características de la rejilla de fibra de Bragg

Figura 23. Parámetros de la rejilla de fibra de Bragg.



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

Las características más importantes de FBG son:

Longitud de onda central

Esta es la longitud de onda central de la banda de reflexión de la rejilla.

Ancho de banda

Este es el ancho de la banda de reflexión y especifica el rango de las longitudes de onda reflejadas.

Pico de reflectancia

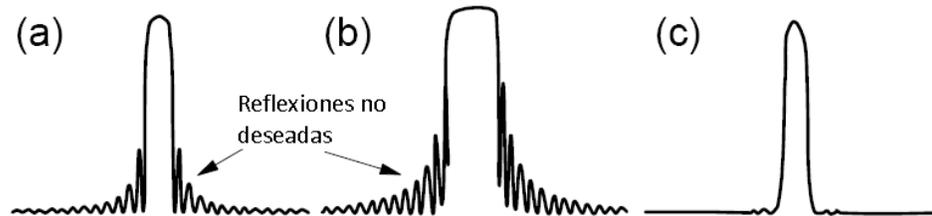
Es la cantidad de proporción de la luz incidente reflejada para la longitud de onda central.

Estas características son determinadas por los parámetros básicos de la rejilla, estas son:

1. El período es la distancia entre las modulaciones del índice de refracción en la rejilla.
2. La longitud.

3. Modulación profunda es determinada por el contraste IR (índice de refracción) dentro de la rejilla.
4. El perfil del contraste de IR (índice de refracción). La modulación profunda puede ser en diferentes partes de la rejilla, por ejemplo tenemos un contraste de IR pequeño al final de la rejilla pero en el medio de la misma tiene un gran contraste. El perfil describe cualquier cambio regular impuesto en el contraste del IR (energía de rejilla) sobre la longitud de la misma. El proceso de realizar los cambios regulares en la energía de la rejilla en orden de las influencias en las características de la rejilla es llamado “*apodisation*” y es descrito a continuación.

Figura 24. Espectro de reflexión de 1 cm de largo FBG con un contraste IR bajo.



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

La figura del espectro de reflexión típico para la rejilla de fibra de Bragg se muestra en la parte a) de la figura 24. Se puede notar la presencia relativa de algunos picos adyacentes en la banda principal de la rejilla. A lo largo de la rejilla muy cercana a la banda principal se presentan reflexiones indeseables y son causados por:

- El promedio de IR de la sección de la rejilla es alto tanto así que hay pérdida de la señal a través del núcleo de la fibra.
- La longitud de onda de la luz que no esta afectada por la rejilla no obstante se ve un cambio abrupto en el índice de reflexión en la parte final de la rejilla.

- Dos parciales espejos se forman en cada parte final de la rejilla.
- Estos espejos actúan como el interferómetro de Fabry-Perot creando condiciones de resonancia entre ellos.
- Estas resonancias están presentes en el borde dentro de la rejilla.

En general la presencia de picos de reflexiones adicionales es altamente indeseable, estas se pueden quitar utilizando el “*apodising*” la rejilla. El proceso que se llama “*Aposidation*” consiste en estrechar la energía de la rejilla por lo que aparentemente el IR cambia gradualmente. La banda reflexión luego de haber pasado por el proceso de “*Aposidation*” se muestra en la figura 24 parte c).

4.5 Banda 1310 nm del amplificador de efecto Raman



Fuente: Harry J. R. Dutton, Understanding Optical Communications

En la figura 25 se observa el efecto Raman en la banda de amplificación de 1310 nm. Este decrecimiento en el cambio de longitud de onda en cuatro fases es bastante apropiado para una señal de bombeo a 1310 nm. Entonces esto es utilizado para desarrollar una señal de bombeo para amplificar la longitud de onda de la señal utilizando SRS, todo esto sucede en la misma longitud de fibra. Esta operación se describe a continuación:

1. La señal de la luz y la de bombeo entran al dispositivo juntas a través de un acoplador de longitud de onda.
2. La luz de bombeo a 1064 nm es cambiado a 1117 nm y sigue al estado de 1240 nm.
3. En 1240 nm la luz se bombeó y llega al siguiente estado, es decir la banda 1310 nm. Y la amplificación se ha obtenido.

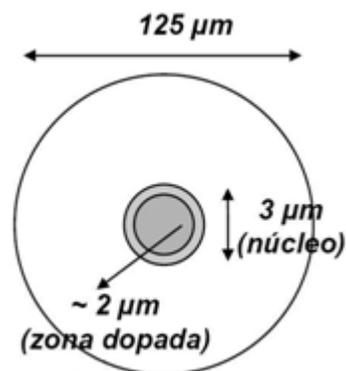
La eficiencia de la ganancia de un núcleo de tamaño angosto es utilizada para incrementar la intensidad de la luz. Además un nivel alto de Germanio es utilizado para incrementar el efecto SRS. El resultado de esto es bastante sorprendente ya que es bastante efectivo y posee muy poco ruido y buena ganancia con señales de entrada relativamente pequeñas.

5. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS AMPLIFICADORES EDFA Y EFECTO RAMAN

5.1 Análisis del amplificador óptico EDFA

Como se muestra en la figura 1, se tienen fuentes láser para bombear la fibra dopada con Erblio y aisladores para evitar que posibles reflexiones en dirección en contra de la señal de entrada que puedan ser amplificadas, sean dispositivos que funcionan en una sola dirección.

Figura 26. Fibra dopada con Erblio.

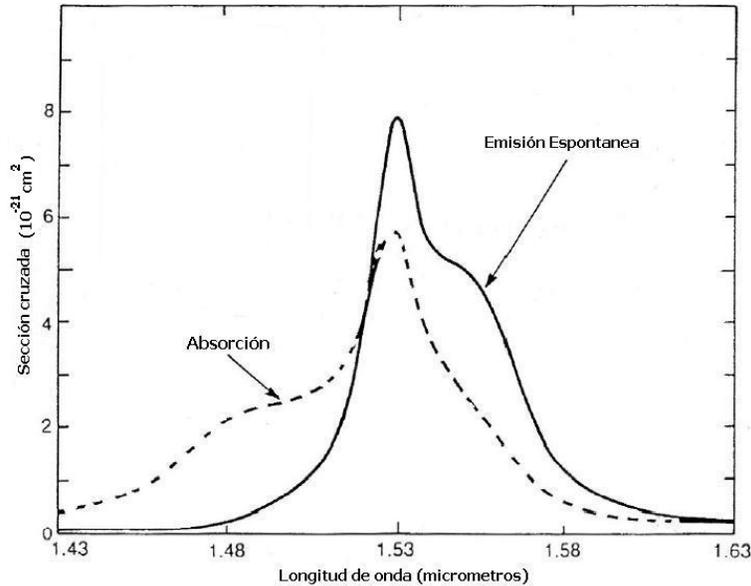


Fuente: J.Franz & V. Jain, Optical Communication Systems

Emisión - Absorción

En la figura 27 se observa la emisión espontánea, esta se extiende entre 1.52 y $1.57 \mu\text{m}$ en plena 3ra ventana, ósea que en estas longitudes de onda se podrá producir la amplificación, en la figura también se muestra la absorción que será máxima en la misma longitud de onda que la emisión espontánea.

Figura 27. Emisión espontánea y absorción de un EDFA.



Fuente: J.Franz & V. Jain, Optical Communication Systems

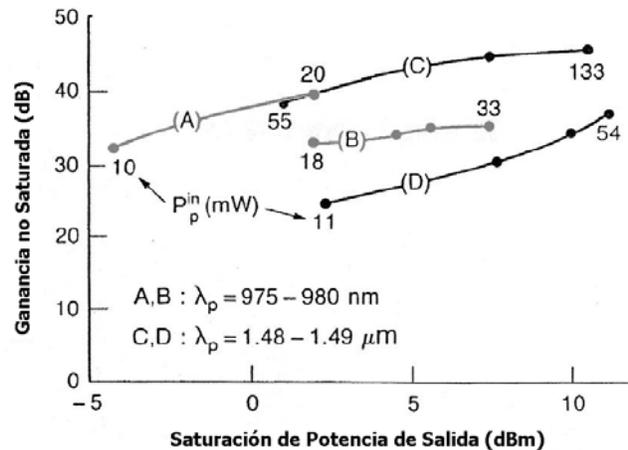
De la figura 27 podemos observar lo siguiente:

- En las longitudes de onda de emisión hay también absorción.
- Se puede bombear en 1.48 μm ya que hay más absorción que emisión.
- La curva de ganancia no es homogénea, significa que hay longitudes de onda que se amplificaran más que otras dentro de la curva de ganancia de amplificación del EDFA.

Bombeo

Existen dos esquemas de bombeo diferentes, uno a 980 nm y otro a 1480 nm. Este último fue preferido en un inicio ya que los de 980 nm estaban en una fase de desarrollo y mejora, en la figura 27 se muestra la diferencia entre ellos.

Figura 28. Comparación del bombeo 980 nm con 1480 nm.



Fuente: J.Franz & V. Jain, Optical Communication Systems

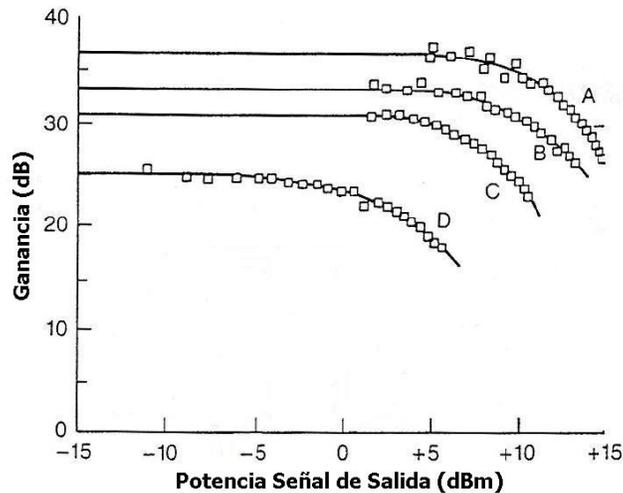
Entre lo más importante que podemos destacar de la figura anterior es:

- El bombeo a 980 nm es más eficiente (se obtiene más ganancia con menos vatios (watts)).
- El bombeo a 1480 nm permite obtener mayores ganancias, sobre todo mayores potencias de salida (aunque el precio a pagar es que se tiene que bombear a mayores potencias)
- Los amplificadores bombeados a 980 nm presentan mejoras frente al ruido (no se observa en la figura).
- Algo que hay que tomar en cuenta es que depende mucho de la aplicación que se implementará, ya que es base a eso se escoge un esquema de bombeo u otro.

Ganancia

El esquema de ganancia de un amplificador se muestra en la figura 29, cuando la señal de entrada es pequeña el amplificador da la máxima ganancia. Cuando la potencia de la señal de entrada es muy grande, el amplificador no puede dar su ganancia y este cae (el amplificador entra en saturación), la potencia de saturación se define como el valor a la salida para el cual la ganancia ha caído 3 dB.

Figura 29. Esquema de ganancia de un EDFA.



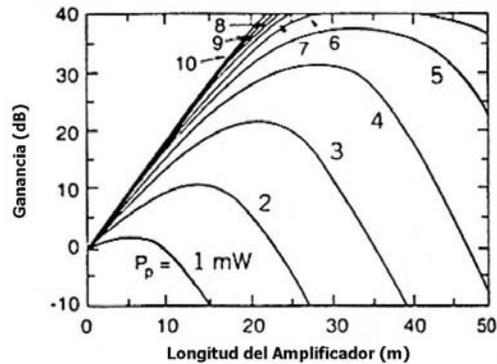
Fuente: J.Franz & V. Jain, Optical Communication Systems

Tabla VI. Valores de potencia de la señal de la figura 29.

	Figura 30		Figura 31	
	P_{pin} (mW)	L_{opt}	G_{max}	$P^{out}_{(dBm)_{sat}}$
A	53.6	47.5	37.1	11.3
B	39.0	43.0	33.6	10.3
C	24.5	40.0	30.4	7.8
D	11.3	39.5	25.2	2.5

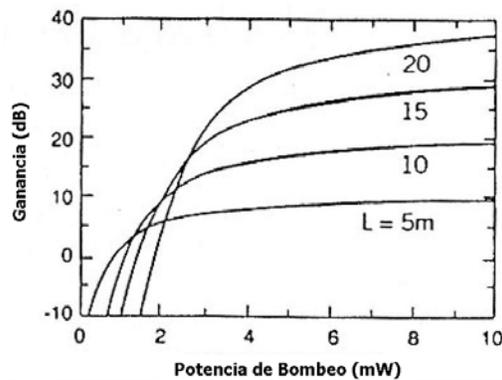
Fuente: J.Franz & V. Jain, Optical Communication Systems

Figura 30. Longitud vrs ganancia.



Fuente: J.Franz & V. Jain, Optical Communication Systems

Figura 31. Bombeo vrs ganancia.



Fuente: J.Franz & V. Jain, Optical Communication Systems

Para cada longitud de fibra (figura 30) existe un bombeo óptimo y para cada potencia de bombeo (figura 31) hay una ganancia máxima posible.

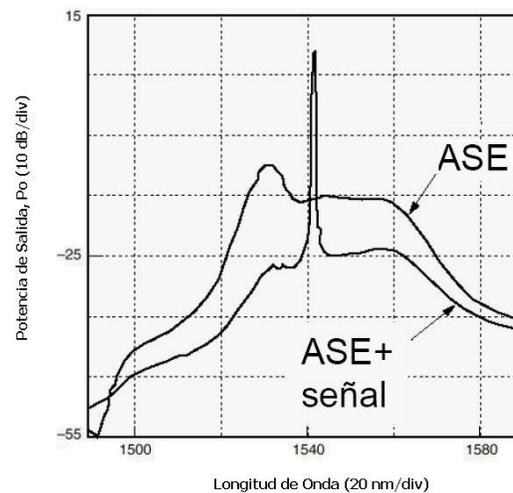
Respuesta en frecuencia

Unas de las tantas ventajas de un amplificador óptico EDFA es ser capaz de amplificar la señal independiente de su tasa de transmisión (de su ancho de banda). Los EDFAs se hacen independientes de la frecuencia cuando las señales tienen frecuencias de modulación mayores de 100 KHz, esto implica que se amplificara cada canal sin que exista alguna mezcla de canales.

Ruido en EDFAs

Todo amplificador introduce ruido a una señal, para el caso de los amplificadores ópticos es por la emisión espontánea que se amplifica en la fibra de Erbio y se le da el nombre de Emisión Espontánea Amplificada ASE (*Amplified Spontaneous Emission*).

Figura 32. Emisión Espontánea Amplificada (ASE).



Fuente: J.Franz & V. Jain, Optical Communication Systems

Para cuantificar la pérdida de la relación señal a ruido (SNR, *Signal-to-noise ratio*), supondremos que tenemos un detector de ruido a la entrada y a la salida del amplificador y tendríamos la siguiente relación:

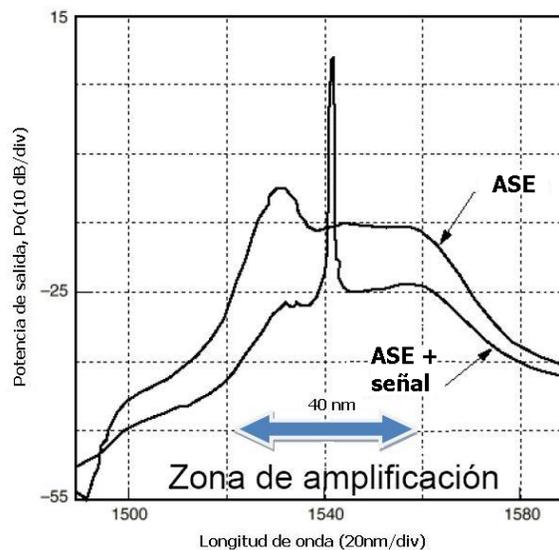
$$SNR_{io} = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$$

SNR_{io} : relación señal a ruido total.

En el mejor de los casos el ruido es de 3dB, para los EDFAs es mucho mayor los valores típicos son 4 - 8 dB utilizando láser de bombeo de 980 nm.

Sin los amplificadores EDFA no hubiese sistemas de comunicación ópticos utilizando DWDM, ya que la ganancia de estos amplificadores posee un ancho de banda óptico suficientemente grande para introducir y amplificar al mismo tiempo un numero elevado de longitudes de onda.

Figura 33. Rango de amplificación de un EDFA.



Fuente: J.Franz & V. Jain, Optical Communication Systems

Ventajas de los EDFAs

- Eficiente transferencia de energía del bombeo de la señal (mayor de 50%).
- Amplificación directa y simultanea de una región ancha de la longitud de onda (en la región de 1550 nm) la potencia de salida es bastante alta como + 37 dBm, con una ganancia relativamente plana (mayor 20dB), el cual es conveniente para los sistemas WDM.
- La salida de saturación es mayor a 1mW (10-25 dBm).

- El constante de tiempo de ganancia es largo (mayor 100 ms) para superar los efectos de distorsión de la intermodulación (bajo ruido).
- Rango dinámico largo (mayor de 80 nm).
- Bajo ruido.
- Posee un formato transparente de modulación óptica.
- Polarización independiente (para reducir las pérdidas por acoplamiento en la transmisión de la fibra).
- Es posible modificar EDFAs para que puedan ser operados en la banda “L”.

Desventajas de los EDFAs

- EDFA no son dispositivos pequeños (fibra es de varios kilómetros) y no puede ser integrado con otros dispositivos semiconductores.
- EDFA presenta una emisión de luz amplificada espontánea (ASE). Eso es siempre y cuando no haya una señal de entrada, existe una señal de salida como resultado de iones excitados en la fibra y esta salida es llamado “ruido espontáneo”.
- Hay ganancia de saturación.
- Opera en tercera ventana, mientras que toda la fibra instalada está preparada para optimizar la dispersión en segunda.
- Acumulación de la dispersión cromática.
- Aparición de fenómenos no lineales
- La no homogeneidad de la ganancia (cada longitud de onda se amplifica de diferente manera).
- No se puede colocar filtros fácilmente, lo que aumenta el ruido y degrada las propiedades del amplificador.

5.2 Análisis del amplificador óptico Raman

Este amplificador se basa en el efecto SRS (*Stimulated Raman Scattering*). Esta no linealidad de las fibras ópticas tiene lugar cuando ésta es atravesada por una radiación monocromática de alta intensidad. Bajo ciertas condiciones, la radiación interactúa con el material dando como resultado la aparición de una nueva longitud de onda, de mayor intensidad que la inicial.

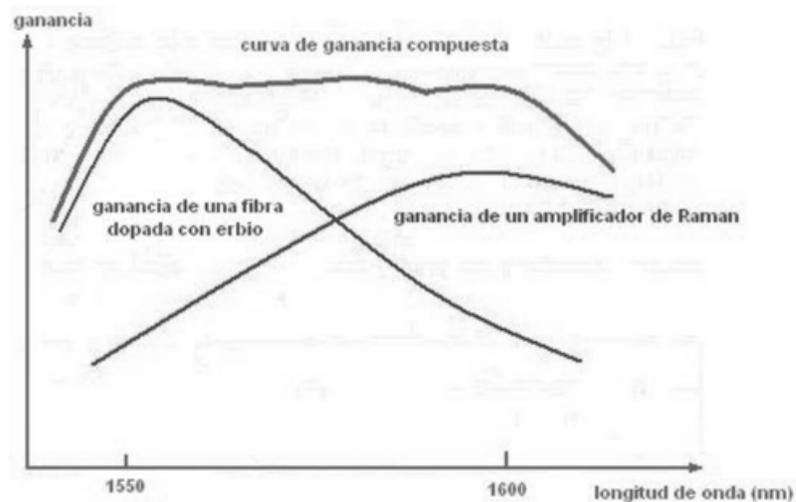
El efecto Raman estimulado, en principio es similar a una emisión estimulada, fenómeno en el cual se basan los amplificadores de fibra dopada. En la emisión estimulada, el fotón que interactúa con el medio provocando la emisión estimulada de otro fotón sigue presente. En el caso del Raman estimulado, después de la interacción entre el fotón y el medio, se genera un nuevo fotón de menor energía (menor frecuencia) y la diferencia de energía se transfiere al material dando lugar a vibraciones moleculares, desapareciendo el fotón inicial.

Las frecuencias que se pueden generar dependen las frecuencias características de las moléculas que componen el material. Si al tiempo que pasa por la fibra óptica la señal de bombeo pasa otra señal con una frecuencia característica del material, esta frecuencia será estimulada. En el caso de un material amorfo, como es una fibra óptica, las frecuencias características del material son un todo casi continuo, es decir, no son un conjunto de frecuencias claramente diferenciadas como ocurre con los materiales mono cristalinos.

Gracias a este concepto se obtiene un nuevo método de amplificar una señal óptica. La señal que provoca la amplificación será la propia señal que transmite la información. Además, si por la fibra se transmite más de un canal, cada uno dará lugar al efecto Raman en su propia frecuencia, produciéndose la amplificación, siempre que estas frecuencias estén dentro del rango de frecuencias características del material.

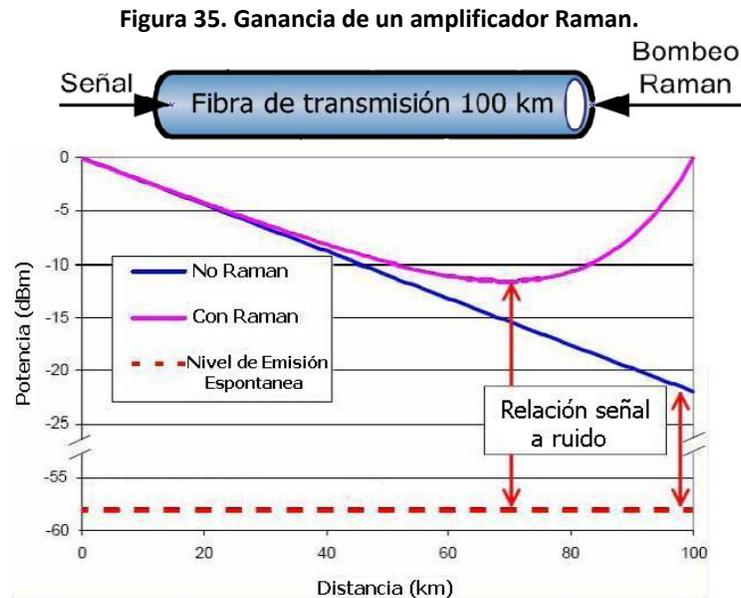
Los principales inconvenientes que presentan estos amplificadores es la necesidad de una alta potencia de bombeo, cercana al vatio. Por el contrario una de sus ventajas es que cubre un margen de longitudes de onda no cubierto por los EDFA, por lo que pueden emplearse de forma complementaria. Este hecho queda reflejado en la siguiente figura, en la que se representa de forma aproximada las zonas de trabajo de cada uno. Como se ve empleando ambos amplificadores se obtiene en el rango comprendido entre los 1530 y 1600 nm una curva ganancia prácticamente plana.

Figura 34. Ganancia de un EDFA y de un RFA.



Fuente: http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_8_2.htm

Los sistemas de más de 1.000 Km (*long haul*) cuando necesitan secciones de repetición de más de 80 Km deben recurrir al uso de Amplificación Raman, el efecto de tal amplificación se muestra gráficamente a continuación:



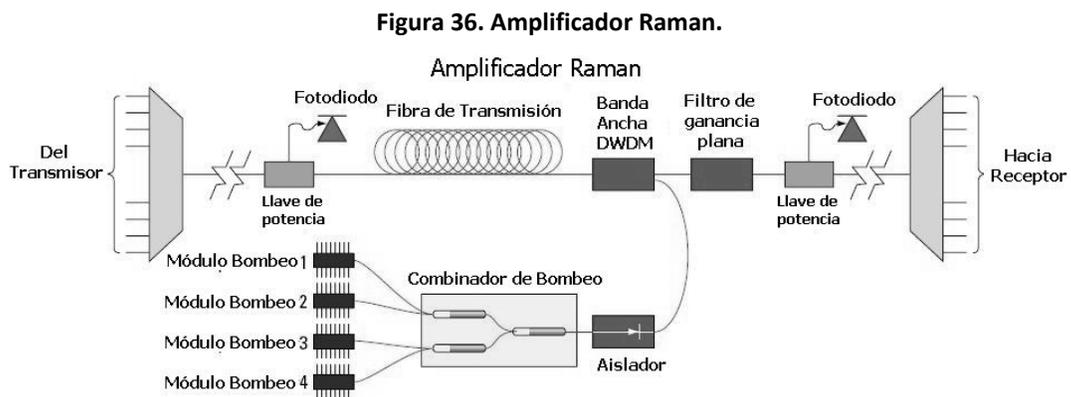
Fuente: Autopista Mesoamericana de Información, SUB PROYECTO DE FIBRA ÓPTICA

Tal como se muestra gráficamente con Amplificación Raman mejora la relación señal a ruido para tramos cada vez más largos. Las tecnologías de los amplificadores ópticos permiten ahora mejorar la sensibilidad de los amplificadores ópticos a fin de limitar la potencia emitida y mejorar la contribución típica al ruido de cada uno de los amplificadores ópticos que es de 5 dB.

Para enlaces largos (alrededor 3,000 km) se necesitan regeneradores cada 400 km para sistemas de larga distancia. La clave está en la amplificación distribuida puede mejorar significativamente la relación señal a ruido esto se obtiene con la amplificación Raman.

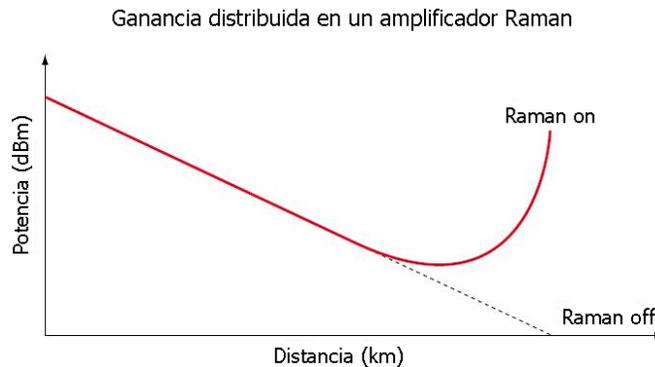
A diferencia de un EDFA en donde hay una sección dopada en la fibra se crea una amplificación cuando es bombeada, la misma fibra de transmisión se convierte en el medio amplificador de un amplificador Raman. En el proceso de Raman la ganancia es creada debido a la conversión del fotón de bombeo con el fotón de la señal, con la producción simultánea de un fotón óptico y este proceso se le llama Dispersión Estimulada (*Stimulated Scattering*). Ya que esto no es un proceso lineal, se necesita una potencia de bombeo bastante elevada por lo regular por arriba de 700 mW.

Como se ve en la figura 36 la potencia de bombeo de Raman es por lo regular transmitida hacia atrás o en dirección contraria a la señal de transmisión. Desde el momento es que la potencia de bombeo es atenuada a lo largo de la fibra de transmisión, la potencia del bombeo se atenúa a lo largo de la longitud de la fibra de transmisión la señal se incrementará en los últimos 20 a 40 km del enlace. La ganancia distribuida en bajos niveles de potencia son necesarios a lo largo de la transmisión para reducir las no-linealidades de la fibra como (FWM) ver figura 37.



Fuente: O. Gautheron, Proceeding of the Optical Fiber Conference 2000.

Figura 37. Bombeo hacia atrás en la fibra de transmisión.



Fuente: O. Gautheron, Proceeding of the Optical Fiber Conference 2000

El bombeo hacia atrás en la fibra de transmisión, hace que la señal tenga una ganancia en aproximadamente de 20 a 40 km de fibra. En ausencia de la ganancia de Raman, la señal continuaría atenuándose debido a la pérdida en la fibra.

Mientras la ganancia de las longitudes de onda en un EDFA es determinado por el nivel de energía de los iones de Erblio por lo regular en el rango 1530 a 1610 nm para la banda C y L. El proceso de amplificación en un Raman depende de la longitud de onda de bombeo y del material de la fibra, para la fibra de Silicio la ganancia ocurre aproximadamente a los 100 nm desde la longitud de onda de bombeo, lo que quiere decir que para señales a 1550 nm se requiere de una señal de bombeo de alrededor de los 1450 nm.

Diferentes longitudes de bombeo permite que la ganancia ocurra en otras ventanas de longitud de onda, la ganancia de ancho de banda es aproximadamente de 20-30 nm de ancho, bastante similar al pico que se ve en el espectro del Erblio. Utilizando múltiple longitudes de onda de bombeo, la ganancia con Raman puede ser reformado quiere decir que se puede cambiar para obtener una ganancia estable o plana en la banda de longitud de onda que nosotros queramos.

Rendimiento de potencia

Para el caso de los EDFAs se requiere una potencia de bombeo de 300 mW o menos, los amplificadores Raman operan con una potencia de bombeo de 700 mW y a veces se requiere hasta de 1 W. Entre los componentes el cual ha ganado mayor potencia óptica es el combinador de bombeo, este componente es utilizado para combinar múltiples láser de bombeo para lograr una potencia alta requerida para la amplificación Raman.

La micro-óptica y fusión-fibra son componentes que pueden ser utilizados como un combinador de bombeo, en estos dispositivos la potencia de diferentes láser de bombeo a diferente longitud de onda son combinados en una salida de fibra.

El dispositivo micro-óptico trabaja utilizando una película delgada como filtro la cual refleja una longitud de onda mientras transmite la segunda, los componentes de micro-óptico son: fibra, alineación de lentes y filtro todo esto cuidadosamente alineado y colocado en su lugar y utilizando la resina epoxi. Para el combinador de bombeo de fusión-fibra dos longitudes de onda permanecen en la fibra, la combinación de las dos longitudes de onda ocurre en la región fusionada donde una longitud de onda es acoplada dentro de la segunda fibra. El dispositivo de fusión-fibra combina dos longitudes de onda separada ambas con un diferencial de acoplamiento a lo largo de la región fusionada, el resultado de la diferencia modal hay superposiciones para separar las longitudes de onda.

Para las altas potencias manipulables esto es esperado en el dispositivo fusión-fibra ya que ofrece un mejor rendimiento, desde que la potencia esta contenida en la fibra, mientras que en el dispositivo micro-óptico, la interfaz de la región es preocupante debido a la contaminación que puede limitar la capacidad de manipulación de potencia.

Flexibilidad y ganancia plana

Los amplificadores requieren componentes para cubrir cierto rango de longitudes de onda. Mientras que las bandas de bombeo para un EDFA fijas son 980 nm o 1480nm, mientras que la ganancia de longitudes de onda en Raman depende de la longitud de onda de bombeo. Muchas veces un número diferente de longitudes de onda de bombeo es utilizado para crear un amplio perfil de ganancia plana con Raman. A diferencia de EDFA en donde el filtro de ganancia plana es utilizando para equalizar la ganancia para diferentes longitudes de onda debido al espectro de ganancia del Erblio, la ganancia plana del amplificador Raman es ajustada cambiando las longitudes de onda de bombeo y potencias individuales de bombeo.

Para determinar las longitudes óptimas de bombeo para un sistema diseñado bajo una variedad de longitudes de onda, existe una fase prototipo en la cual se prueban las diferentes longitudes de onda que mejor funcionen en el diseño. Por esta razón los componentes de Raman deben ser capaces de encarar rápidamente nuevas longitudes de onda.

Una diferencia entre EDFA y los amplificadores Raman es la dependencia a la polarización de la ganancia del proceso de amplificación. En un EDFA la dependencia de polarización es mínimo y no se requiere especiales precauciones, usualmente toman la orientación de la señal de bombeo o de la polarización de señal. La ganancia en Raman sin embargo es dependiente de la polarización, para minimizar esto cualquier polarización en la entrada desde el láser de bombeo debe ser mezclado o dos polarizaciones ortogonales en la misma longitud de onda deben ser combinadas.

A diferencia de los combinadores de bombeo donde diferentes longitudes de onda son combinadas, un haz de polarización combina dos láseres de bombeo en la misma longitud de onda pero con polarización ortogonal.

Tendencias

Existe un número de diferencias entre EDFA y amplificadores Raman, la tendencia de los EDFA apuntan a futuros requerimientos para los componentes pasivos de los amplificadores Raman. Potencias mas altas en el amplificador serán necesarias para mantener canales disponibles, largas distancias y una tasa de bits bastante alta para los sistemas DWDM. También se necesitará bandas mas anchas para los amplificadores, mientras tanto un EDFA esta limitado al espectro del Erbium, los amplificadores Raman abrirán una ventana de amplificación como es la banda S y S+ que están en el rango 1450 a 1520 nm, requiriendo componentes que operen en esas longitudes de onda. Los amplificadores Raman son una tecnología crítica, ya que esta se utiliza para permitir los enlaces ultra largos y a una tasa de velocidad bastante alta.

5.3 Comparativa de los amplificadores EDFA Vrs. Raman

EDFA

- Más utilizado en sistemas de comunicaciones ópticas:
 - Utilizado en la banda C (menor atenuación en la fibra)
 - Utiliza fibra según el estándar de la ITU-T G.652
- Ventajas:
 - Opera en el rango de 1520-1610 nm
 - $G > 45\text{dB}$, $P_{\text{out}} > 37\text{ dBm}$, NF [3.5 a 7]dB
 - Baja diafonía entre múltiples canales
 - Eficiente transferencia de energía del bombeo de la señal (mayor de 50%).
 - Amplificación directa y simultánea de una región ancha de la longitud de onda (en la región de 1550 nm) la potencia de salida es bastante alta como + 37 dBm, con una ganancia relativamente plana (mayor 20dB), el cual es conveniente para los sistemas WDM.
 - La salida de saturación es mayor a 1mW (10-25 dBm).
 - El constante de tiempo de ganancia es largo (mayor 100 ms) para superar los efectos de distorsión de la intermodulación (bajo ruido).
 - Rango dinámico largo (mayor de 80 nm).
 - Bajo ruido.
 - Posee un formato transparente de modulación óptica.
 - Polarización independiente (para reducir las pérdidas por acoplamiento en la transmisión de la fibra).
 - Es posible modificar EDFAs para que puedan ser operados en la banda "L".

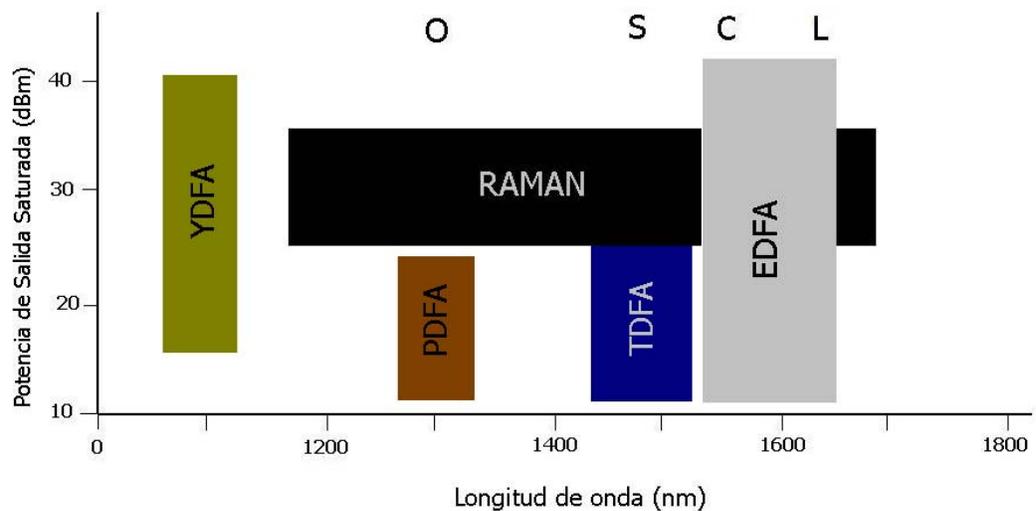
- Desventajas:
 - El espacio físico en donde se tienen que colocar ya que no son dispositivos pequeños.
 - El espectro de ganancia no es plano.
 - EDFA no son dispositivos pequeños (fibra es de varios kilómetros) y no puede ser integrado con otros dispositivos semiconductores.
 - EDFA presenta una emisión de luz amplificada espontánea (ASE). Eso es siempre y cuando no haya una señal de entrada, existe una señal de salida como resultado de iones excitados en la fibra y esta salida es llamado "ruido espontáneo".
 - Hay ganancia de saturación.
 - Opera en tercera ventana, mientras que toda la fibra instalada está preparada para optimizar la dispersión en segunda.
 - Acumulación de la dispersión cromática.
 - Aparición de fenómenos no lineales
 - No homogeneidad de la ganancia (cada longitud de onda se amplifica de diferente manera).
 - No se puede colocar filtros fácilmente, lo que aumenta el ruido y degrada las propiedades del amplificador.

RAMAN:

- Esta basado en la dispersión estimulada de Raman, se puede aplicar en fibra común (no tiene que estar dopada con algún elemento)
- Utiliza fibra según el estándar de la ITU-T G.652
- $G [10 \text{ a } 15] \text{ dB}$, $P_{out} > 30 \text{ dBm}$, $NF < 1 \text{ dB}$

- Ventajas:
 - Puede trabajar en la región de 1250 a 1650 nm.
 - Ancho de banda puede ser (1 bombeo 35nm, más bombeos arriba de 90nm)
 - Figura de ruido mas bajo que EDFA
 - Alta eficiencia con DCF respecto a las pérdidas en la fibra
- Desventajas:
 - Alta diafonía entre canales mas que EDFA
- Altas potencias de bombeo (aumenta los inconvenientes)

Figura 38. Raman trabaja en diferentes bandas de operación.



Fuente: <http://www.ces.newt>

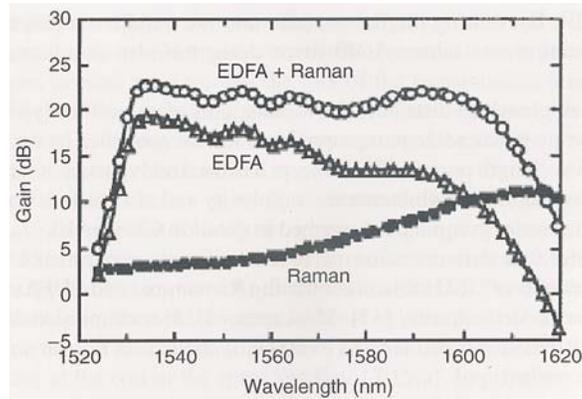
EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier

TDFA: Thulium Doped Fiber Amplifier

YDFA: Ytterbium Doped Fiber Amplifier

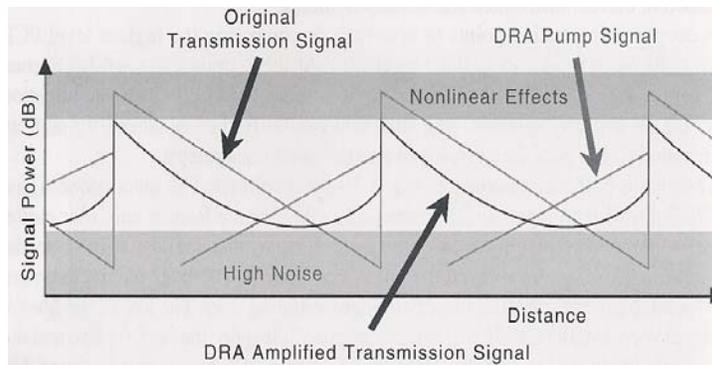
PDFA: Praseodymium Doped Fiber Amplifier

Figura 39. EDFA + Raman.



Fuente: <http://www.ces.newt>

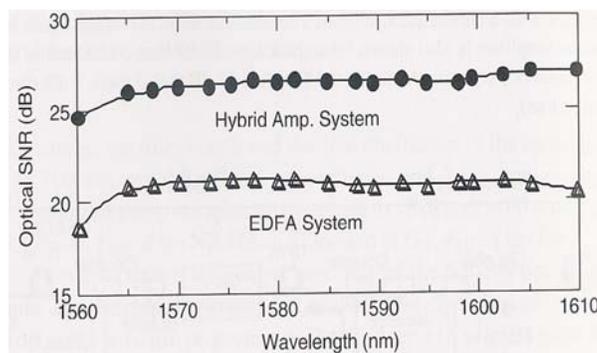
Figura 40. Potencia señal EDFA + Raman de un sistema periódico amplificado.



Fuente: <http://www.ces.newt>

Comparación entre la señal original (sistema EDFA) y un sistema híbrido.

Figura 41. EDFA + Raman, mejora del OSNR.



Fuente: <http://www.ces.newt>

En la siguiente tabla se muestra un poco mas claro los casos en que se utilizan amplificadores EDFA o Raman en un enlace.

Tabla VII. Tabla comparativa EDFA vrs Raman.

Aplicación /Parámetro	DWDM (MAN/WAN)	DWDM (largo alcance)
Canales por fibra	32-80	80-160
Espectro utilizado (bandas)	C, L	C, L, S
Espaciado entre canales	0.8 nm (100 GHz)	0.4 nm (50 GHz)
Capacidad por canal	10 Gb/s	10-40 Gb/s
Capacidad de la fibra	100-1000 Gb/s	>1 Tb/s
Tipo de láser	DFB enfriado	DFB enfriado
Tecnología de filtros	TFF, AWG, FBG	TFF, AWG, FBG
Distancia	cientos de km	miles de km
Coste	Medio	alto
Amplificación óptica	EDFA	EDFA, Raman

Fuente: Shien-Kuei Liaw, Investigate C+L Band EDFA/Raman Amplifiers by Using the Same Pump Lasers.

5.4 Amplificadores EDFA/Raman utilizando el mismo láser de bombeo

5.4.1 Introducción

Las bandas C+L (hibrido) incluye amplificador de fibra dopada con Erblio y el amplificador de fibra Raman (EDFA/RFA) es construido compartiendo la misma fuente de bombeo, esto se basa los mecanismos de amplificación en la banda C, banda L y el mecanismo de cambio de Raman. El espectro de ganancia de la banda C+L es aplanado por la optimización de la relación de la potencia de bombeo de EDFA/RFA. La ganancia puede variar en 14 ± 1 dB para la banda C (EDFA) y 13 ± 1.5 dB para la banda L (RFA) sin la ganancia de la ecualización. El bajo ruido de la banda hibrida C+L EDFA/RFA se puede encontrar una serie de aplicaciones en DWDM o WDM.

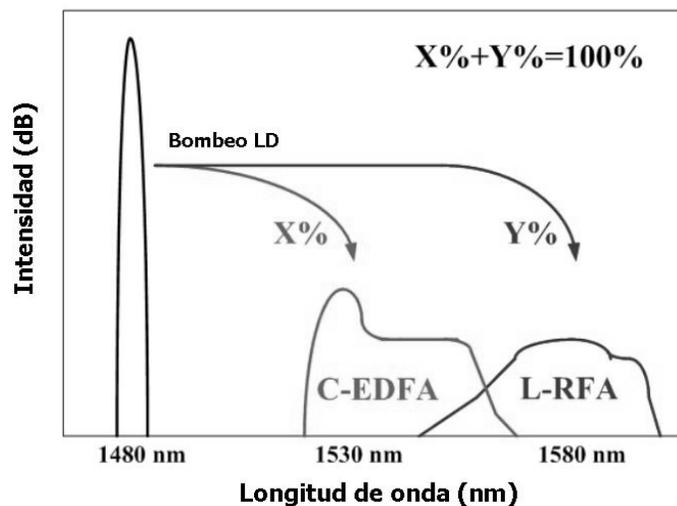
Los amplificadores ópticos son indispensables para compensar la pérdida en la fibra por los sistemas de transmisión largos. Con un amplio ancho de banda de ganancia, por lo regular los EDFAs se utilizan en los sistemas WDM en el cual amplifican todos los canales simultáneamente sin distorsión en la señal y diafonía. Los EDFAs son adecuados para operar en la banda C de 1530 a 1565 nm. Para que toda la banda C de EDFA sea utilizada se necesita más canales ópticos y más ancho de banda óptico ya que esto es una limitante. Para extender el ancho de banda óptico e incrementar el número de canales en WDM, los amplificadores de la banda L pueden ser utilizados para longitudes de onda de 1570 a 1605 nm. Por si mismo los EDFAs poseen una muy baja ganancia en la banda L, debido a que tienen problemas de atenuación de bombeo y sus longitudes de operación comprende de 1530 a 1560 nm, los RFA tienen el merito de poseer una amplia ganancia, en los largos enlaces de los sistemas DWDM.

Los RFA pueden ser utilizados no solamente la banda C, sino también la banda S, L y otras bandas dependiendo de la señal de bombeo. RFA posee muchas ventajas incluyendo baja figura de ruido (NF), flexibilidad en la selección de la ganancia media y un amplio ancho de banda de ganancia, también tiene la capacidad de distribuir la ganancia sobre una larga distancia en la fibra de transmisión.

5.4.2 Principio de la propuesta del amplificador con banda híbrida C+L

La dispersión estimulada de Raman es un mecanismo de pérdida cuando roba energía desde la longitud de onda más corta y transfiere a la longitud de onda mas larga. Esto quiere decir que la amplificación de Raman puede extraer energía desde el haz de bombeo para amplificar una débil señal óptica de otra longitud de onda. El efecto Raman es una interacción entre la luz y el material que causa un cambio en una longitud de onda distinta, usualmente a una longitud de onda larga. La cantidad que cambiará depende del material y de la energía de excitación tal como vibraciones automáticas. Si el bombeo de Raman es de 1480 nm, le correspondería un pico de ganancia. En la figura 41 muestra el concepto de utilizar únicamente un láser de bombeo para banda C/EDFA y L/RFA.

Figura 42. Utilización de un láser de bombeo para las bandas C/EDFA y L/RFA.

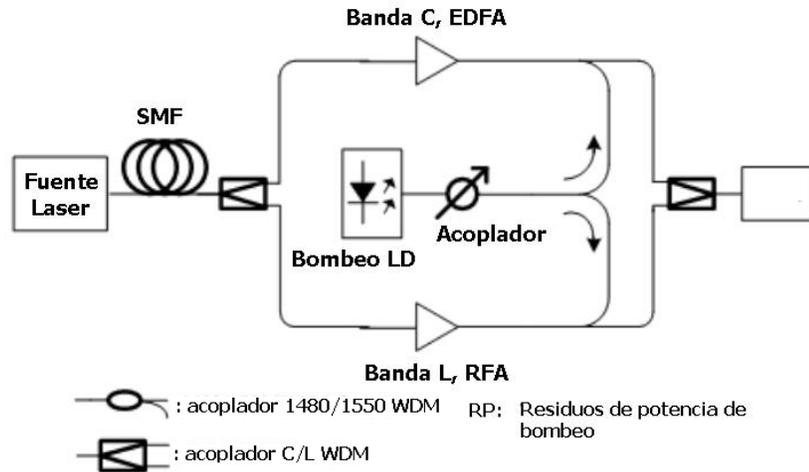


Fuente: Shien-Kuei Liaw, Investigate C+L Band EDFA/Raman Amplifiers by Using the Same Pump Lasers.

Únicamente teniendo una longitud de bombeo de 1480 nm, la banda C de EDFA esta basado en el mecanismo de amplificación de los iones del Erblio, mientras que la banda L de RFA esta basado en el mecanismo de amplificación de cambio Raman. La figura 43 muestra un esquema de la propuesta de la banda hibrida C+L EDFA/RFA compartiendo el mismo bombeo. En la entrada del amplificador óptico, un acoplador WDM es utilizado para separar las señales WDM en las bandas C y L. La señales de la banda C son amplificadas por EDFA y las señales de la banda L son amplificadas por RFA. Los dos amplificadores comparten la fuente de bombeo de 1480 nm, el cual es filtrado por un acoplador variable ganancia ecualizado en las bandas C y L. Para incrementar la ganancia de EDFA y reducir la ganancia dependiente de polarización de RFA, la configuración de bombeo hacia atrás es adoptada por la inyección de fuentes de bombeo desde la parte final de la fibra para el amplificador de banda hibrida C+L. Desde el momento que EDFA tiene una eficiencia de ganancia igual que la de RFA, una pequeña relación de potencia de bombeo es utilizada para proveer ganancia para la banda C de EDFA.

La división de la relación del láser de bombeo entre la banda C de EDFA y la banda L de RFA es optimizada basado sus características de ganancias tales como propiedades físicas de EDF y DCF para una eficiencia en el bombeo.

Figura 43. Diagrama propuesto para la banda híbrida EDFA/RFA.



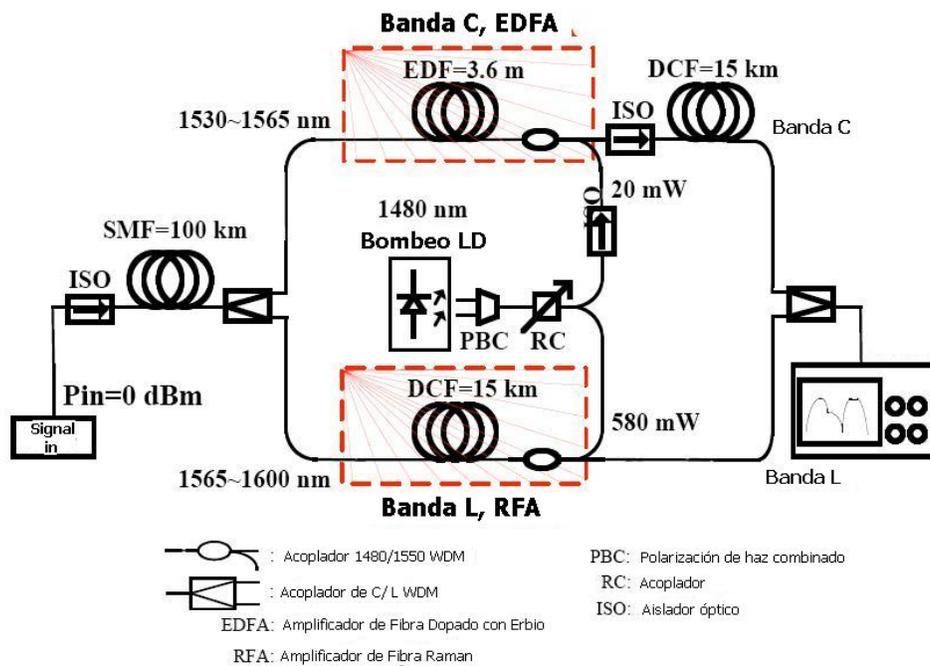
Fuente: Shien-Kuei Liaw, Investigate C+L Band EDFA/Raman Amplifiers by Using the Same Pump Lasers.

5.4.3 Configuración experimental

La configuración experimental se puede ver en la figura 43, no se necesita fuente de potencia de bombeo extra, dos láser de bombeo a 1480 nm con un total de potencia de 600 mW, combinado a través de la polarización de haz (PBC, Polarization beam combiner), es utilizado como reemplazo. El PBC tiene una inserción de pérdida de 0.7 dB, PBC puede combinar dos diodos de bombeo con la misma longitud de onda en un estado de polarización ortogonal. La banda C/EDFA utiliza 3.6 metros de EDF y 15 km de DCF., la absorción de EDF es 11.2 dB/m a 980 nm y 17.5 dB/m a 1530 nm. La DCF tiene pérdidas como el parámetro de dispersión y el coeficiente no-lineal de 0.4 dB/m, -110 ps/nm/km y $14.5 \times 10^{-10} \text{W}^{-1}$ respectivamente, medidos a 1550 nm. Mientras que en la banda L RFA utiliza 15 km de DCF para compensar ambas dispersiones y la amplificación Raman.

DCF posee un diámetro de núcleo más pequeño que el estándar de la fibra monomodo para proporcionar una ganancia Raman más larga. La banda C/EDFA utiliza 15 km DCF para compensar la dispersión de 100 km de fibra monomodo (SMF, Single Mode Fiber). Una delgada línea ajustable de láser establecida a -20 dBm de potencia de entrada es aplicada desde 1530 a 1600 nm con 5 nm de intervalo para la ganancia y de medidas de figura de ruido (NF).

Figura 44. Configuración experimental para la banda C+L EDFA/RFA



Fuente: Shien-Kuei Liaw, Investigate C+L Band EDFA/Raman Amplifiers by Using the Same Pump Lasers.

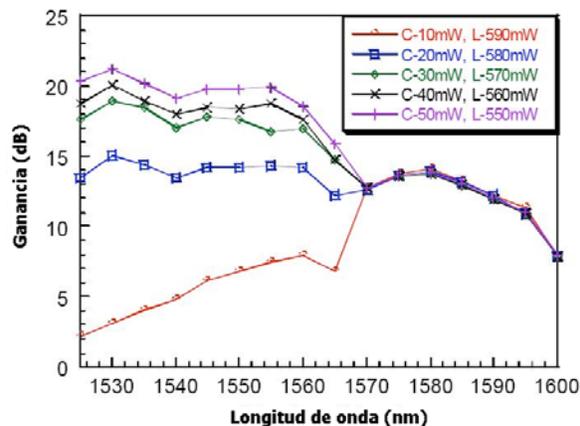
5.4.4 Discusión de los resultados de la banda híbrida

En la figura 45 se muestra las mediciones totales del espectro de ganancia de la banda híbrida C+L EDFA/RFA bajo varios coeficientes de bombeo. El total de la ganancia es definido por el incremento de la señal de potencia desde la entrada del acoplador C/L WDM a la salida del acoplador C/L WDM, incluye 6.6 dB de pérdida de DCF por cada banda.

La potencia total de bombeo es de 600 mW esto se obtiene combinando dos láser de bombeo de 300 mW. La potencia de bombeo es dividida entre 20 mW para la banda C/EDFA y 580 mW para la banda L/RFA, corresponde compartir la potencia de bombeo a una relación de 1:29. Hay que tomar en cuenta la totalidad de la ganancia es mas pequeña que el valor efectivo de la ganancia de Raman. La perdida total por inserción es de 8.5 dB a 1550 nm por componente de la fibra ya incluyendo los acopladores C/L WDM, acoplador 1480/1550 nm WDM y DCF. La perdida por DCF en la banda L/RFA es de 0.4 dB/km, por lo que la ganancia efectiva es al menos de 8.5 dB mas que el total de la ganancia por RFA.

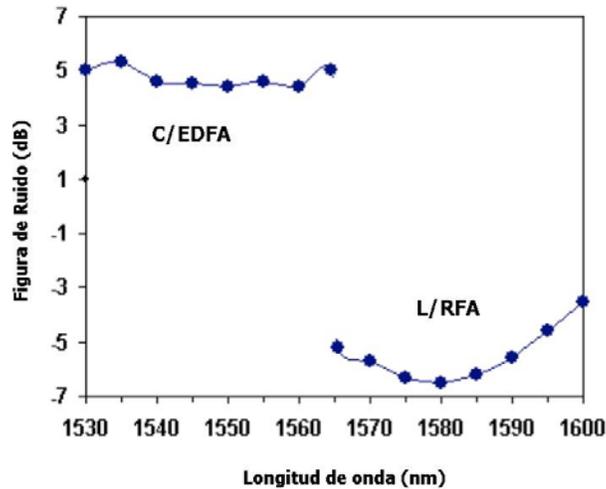
La medición de la figura de ruido de la banda híbrida C+L con relación de bombeo de 1:29 se muestra en la figura 45. Para la banda C/EDFA el NF (*Noise Figure*) el rango es de 4.4 a 5.3 dB, el valor mas alto de NF a 1535 nm es atribuido a la emisión espontanea amplificada (ASE, Amplified Stimulated Emission), para la banda L/RFA el valor NF esta en el rango -6.5 a -3.5 dB, el peor NF a 1600 nm es atribuido a la baja ganancia en la región de RFA.

Figura 45. Medida general para obtener el espectro de la banda C+L EDFA/RFA.



Fuente: Shien-Kuei Liaw, Investigate C+L Band EDFA/Raman Amplifiers by Using the Same Pump Lasers.

Figura 46. Medición de la figura de ruido de la banda C+L vrs longitud de onda.



Fuente: Shien-Kuei Liaw, Investigate C+L Band EDFA/Raman Amplifiers by Using the Same Pump Lasers.

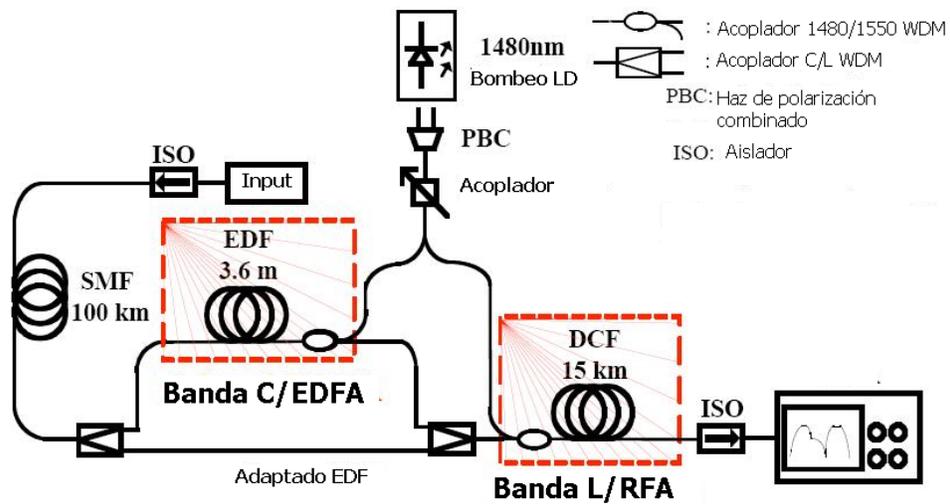
5.4.5 Resumen de la configuración de banda híbrida

El total de la ganancia y de las características de NF de los dos amplificadores es mostrado en la figura 44 y 47, ya que son similares unos del otro exceptuando que el RFA esta reenviando el bombeo en la figura 47. No obstante las señales sufren un pequeño efecto PDG desde que el par de láser de bombeo es lanzado dentro de DCF en un estado ortogonal.

El concepto de un amplificador híbrido de bandas C+L EDFA/RFA utilizando únicamente una fuente de señal de bombeo, se basa en el concepto de los tres mecanismos amplificación por la banda C/EDFA y mecanismo de amplificación de cambio de Raman para la banda L/RFA misma.

Este híbrido posee la ventaja de simplificar el diseño de la fuente de bombeo, la división óptima para la potencia de bombeo es de 1:29 para EDFA/RFA, el híbrido C+L con características de un amplio ancho de banda, ganancia plana y baja figura de ruido, ya que con este diseño se podría aplicar a muchos sistemas WDM.

Figura 47. Esquema del amplificador híbrido de banda C+L EDFA/RFA.



Fuente: Shien-Kuei Liaw, Investigate C+L Band EDFA/Raman Amplifiers by Using the Same Pump Lasers.

Esquema el cual se busca reducir el costo del amplificador híbrido de banda C+L EDFA/RFA, el DCF es 50% menor colocando los 15 km de DCF en el segundo acoplador C/L WDM.

6. MÉTODO GUÍA PARA LA UTILIZACIÓN DE LOS AMPLIFICADORES EDFA Y RAMAN

6.1 Introducción

Teniendo en cuenta los capítulos anteriores y la facilidad que dan los programas (en este caso hoja de cálculo desarrollada en Excel), se realizó un pequeño programa que servirá de guía para la toma de decisiones.

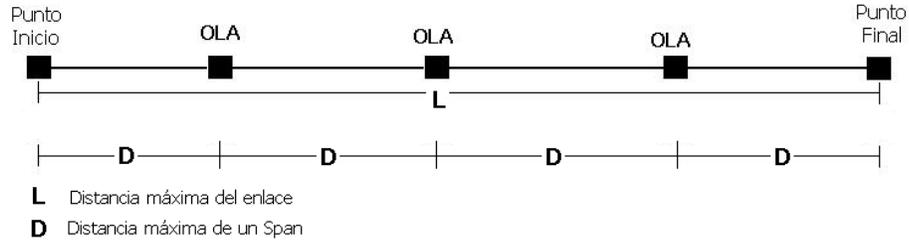
El programa consiste básicamente en dos métodos los cuales se explican a continuación:

Figura 48. Pantalla principal del programa.



En la figura 49 podemos observar la distancia entre span, la distancia "D" no necesariamente tiene que tener el mismo valor para todo el enlace, sino que puede variar en unos kilómetros.

Figura 49. Muestra la distancia máxima de un Span.

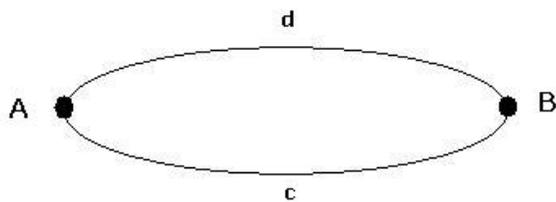


Cuando hablemos de redundancia entre un punto A al punto B, podemos diferenciarlos de la siguiente manera:

- Redundancia por enlace

En la figura 50 podemos observar que del punto A hacia B existe dos líneas de conexión “c” y “d”, la línea “c” estará siempre activa ósea es el enlace principal, mientras que la línea “d” esta en standby ósea es el enlace secundario. El enlace de la línea “d” entrara en servicio cuando la línea principal “c” deje de funcionar por cualquier motivo.

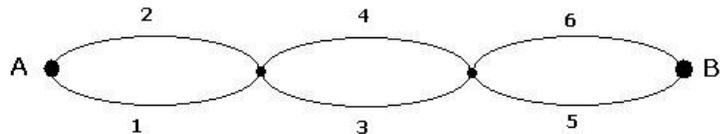
Figura 50. Redundancia por enlace.



- Redundancia por Span

Cuando de un punto A hacia B pasa por diferentes saltos o spans (ver figura 51) se duplica el número de spans, por ejemplo en la figura X se observa que si se quiere llegar del punto A hacia el punto B existe 3 saltos (1, 3, 5), pero como es una redundancia por Span se agregan los saltos (2, 4, 6). El número de span se duplica en este tipo de redundancia debido a que los 6 saltos se mantienen activos al mismo tiempo y no como en la redundancia por Enlace que cuando el enlace principal se cae entra a funcionar el secundario.

Figura 51. Redundancia por Span.



Cuando se diseña un sistema de comunicación óptica se necesitan saber ciertos parámetros importantes a tomar en cuenta para seleccionar uno u otro amplificador. Las cantidades que se mencionan en la siguiente tabla son tomadas en base a la experiencia y relato de otros profesionales en el campo.

Tabla VIII. Relación entre los factores de un enlace y los amplificadores ópticos.

	Condición	Tipo de amplificador
# de Lambdas (Gbps)	> 16	EDFA
	< 16	Raman
# de Spans (Saltos)	> 6	Raman
	< 6	EDFA
Distancia máxima Span (km)	> 120	Raman
	< 120	EDFA

Mas adelante en este capítulo se realizan cálculos para sacar la holgura con que puede llegar una señal (depende si se utiliza un amplificador Raman o EDFA) al receptor. En la figura 52 podemos observar que en la parte del transmisor existe una potencia máxima, la cual denominaremos Tx, esta potencia recorrerá una distancia de X kilómetros y en el lado del receptor tendremos una sensibilidad que denominaremos Rx.

Vamos a definir H como la cantidad en dB, la cual debe ser un valor positivo para que el enlace sea factible, si en los cálculos se toman diferentes distancias y el resultado de la holgura da un valor negativo, esto quiere decir de que esa distancia no es factible para el enlace dado que la señal transmitida no llegaría al receptor. A continuación se coloca los parámetros que se toman en cuenta.

Pérdida en la fibra (Pf), lo definimos como la multiplicación de la distancia máxima del span por el coeficiente de atenuación de la fibra.

Pérdida en los conectores (Pc), dado que cada conector introduce una perdida en dB este parámetro se toma en cuenta.

Pérdida por empalme (splicing) (Ps), debido a que es necesario realizar empalmes dado que la fibra no viene en bloques mayores de 4 kms.

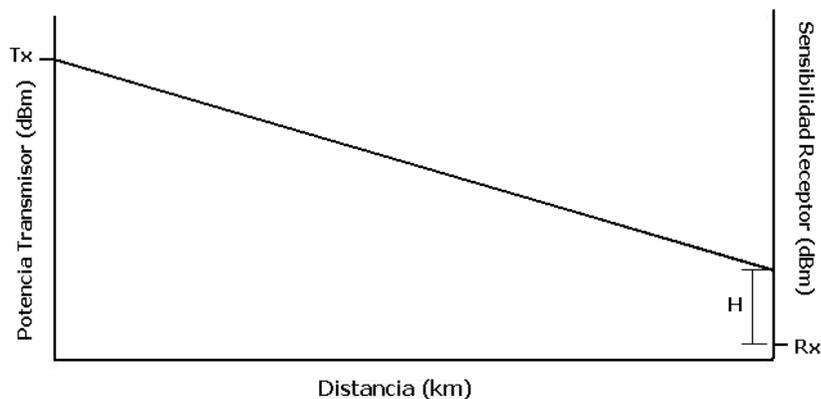
Potencia transmisor (Tx), potencia con la cual la señal saldrá del transmisor.

Sensibilidad receptor (Rx), es el parámetro con que se mide en la parte del receptor en la cual que tan sensible es para las señales que reciba muy débiles, se maneja con valores negativos.

Holgura (H), la definimos como la potencia del transmisor menos la sensibilidad y el resto de perdidas.

$$H_{dB} = P_{Tx} - S_{Rx} - (P_f + P_c + P_s)$$

Figura 52. Holgura en que llega la señal al receptor.



Cada uno de los amplificadores posee un Tx y Rx, al igual que cada tipo de fibra tiene un coeficiente de atenuación distinto. Las pérdidas en los conectores y en los empalmes ya están incluidas en la pérdida de la fibra por lo que cuando se realice el cálculo de la distancia "X" por el coeficiente de atenuación nos dará toda la pérdida a tomar en cuenta. A continuación se colocan los valores que se utilizaron en los dos métodos.

Tabla IX. Potencia Transmisión y Recepción.

	Potencia transmisor (Tx)	Sensibilidad receptor (Rx)
EDFA	17 dBm	-28 dBm
Raman	27 dBm	-36 dBm

Tabla X. Coeficiente de atenuación para fibra G.652 y G.655.

	Coeficiente de atenuación de la fibra (dB/km)
Fibra G.652	0.23
Fibra G.655	0.19

$$H_{dB_EDFA} = 17 - (-28) - (X * C_{atenua})$$

$$H_{dB_Raman} = 27 - (-36) - (X * C_{atenua})$$

A continuación se describe el proceso que se realizó a cada uno de ellos.

- **Método A**

Consiste en ingresar los valores tales como la distancia total del enlace, el cual lo definimos con la letra “B”, luego se ingresa el número de Lambdas que se utilizarán y la definimos como “C”, se ingresa el tipo de redundancia del enlace la definimos como “D” y por último se pide al usuario que ingrese el tipo de fibra según definido por la ITU-T para la tecnología DWDM (puede ser G.652 o G.655) y asignamos la letra “E”. En este método se tomó en cuenta la cantidad de 80 km para la distancia máxima de un span (o números de saltos), hay que mencionar la recomendación de la ITU-T G.692 para el diseño de sistemas de comunicaciones ópticas, la cual define como distancias máximas las cantidades de 80, 100 y 120 kms por cada span en un enlace.

Figura 53. Pantalla de ingreso de datos Método A.

Método A

Ingresar distancia total del enlace (km)

Ingrese número de lambdas a utilizar

Ingresar tipo de redundancia (por Span o por Enlace)

Ingresar tipo de Fibra (G.652 ó G.655)

Calcular

Luego de que el usuario ingrese los datos y presione el botón de “Calcular”, saldrá la siguiente pantalla desplegando los datos.

Figura 54. Pantalla de resultados del Método A.

Resultados Método A

Distancia total del enlace (km)

Número de Spans con decimales

Número de Lambdas utilizadas

Spans tomando en cuenta el # de Lambdas

Tipo de redundancia

Número de Spans segun redundancia

Tipo de fibra utilizada

Amplificador recomendado es el: **Nombre del amplificador**

- Método B

Consiste en ingresar los valores tales como la distancia máxima del Span lo definimos con la letra “B”, luego se ingresa el número de Lambdas que se utilizarán y la definimos como “C”, se ingresa el número de spans y le asignamos la letra “D”, se ingresa el tipo de redundancia del enlace la definimos como “E” y por último se pide al usuario que ingrese el tipo de fibra según definido por la ITU para la tecnología DWDM y asignamos la letra “F”.

Figura 55. Pantalla de ingreso de datos Método B.

Método B

Ingresar distancia máxima entre Spans (km)

Ingrese número de Spans a utilizar

Ingrese número de lambdas a utilizar

Ingresar tipo de redundancia (por Span o por Enlace)

Ingresar tipo de fibra (G.652 ó G.655)

Calcular

Luego de que el usuario ingrese los datos y presione el botón de “Calcular”, saldrá la siguiente pantalla desplegando los datos.

Figura 56. Pantalla de resultados del Método B.

Resultados Método B

Distancia total del enlace (km)	<input type="text"/>	Distancia máxima entre Spans (km)	<input type="text"/>
Número de Lambdas utilizadas	<input type="text"/>	Número de Spans	<input type="text"/>
Tipo de redundancia	<input type="text"/>	# de Spans segun redundancia	<input type="text"/>
Tipo de fibra utilizada	<input type="text"/>		

Amplificador recomendado es el: **Nombre del amplificador**

NOTA: Si redundancia es por Span duplica # spans, en caso contrario el # spans se mantiene. Por lo tanto la distancia total se duplica para el primer caso.

6.2 Resultados utilizando el Método A

6.2.1 Tabulación de datos

De acuerdo a lo que se describió en el punto anterior, el ingreso se realizará para que la recomendación sea un amplificador EDFA.

Figura 57. Ingreso de datos del utilizando el Método A.

Método A

Ingresar distancia total del enlace (km)

Ingrese número de lambdas a utilizar

Ingresar tipo de redundancia (por Span o por Enlace)

Ingresar tipo de Fibra (G.652 ó G.655)

Calcular

Luego de haber ingresado los datos, seleccionamos la opción de calcular y según ciertos criterios tomados por la experiencia y otros por recomendaciones de la ITU, nos da los siguientes resultados.

Figura 58. Resultados de la matriz A.

Resultados Método A

Distancia total del enlace (km) Número de Spans con decimales

Número de Lambdas utilizadas # Spans tomando en cuenta el # de Lambdas

Tipo de redundancia Número de Spans segun redundancia

Tipo de fibra utilizada

Amplificador recomendado es el: **EDFA**

De acuerdo con el ejemplo anterior, ahora el ingreso se realizará para que la recomendación sea un amplificador Raman.

Figura 59. Ingreso de datos para el Método A.

Método A

Ingresar distancia total del enlace (km)	<input type="text" value="300"/>	<input type="button" value="Calcular"/>	<input type="button" value="📄"/>
Ingrese número de lambdas a utilizar	<input type="text" value="8"/>		
Ingresar tipo de redundancia (por Span o por Enlace)	<input type="text" value="Span"/>		
Ingresar tipo de Fibra (G.652 ó G.655)	<input type="text" value="G.652"/>		

Figura 60. Resultados del Método A.

Resultados Método A

Distancia total del enlace (km)	<input type="text" value="300"/>	Número de Spans con decimales	<input type="text" value="3.75"/>
Número de Lambdas utilizadas	<input type="text" value="8"/>	# Spans tomando en cuenta el # de Lambdas	<input type="text" value="4"/>
Tipo de redundancia	<input type="text" value="Span"/>	Número de Spans segun redundancia	<input type="text" value="8"/>
Tipo de fibra utilizada	<input type="text" value="G.652"/>	Amplificador recomendado es el: Raman	

6.2.2 Explicación de las condiciones

Anteriormente se mencionó que el programa se rige a ciertas condiciones, las cuales se obtienen por recomendación de la ITU-T y otras condiciones en base a la experiencia en el diseño de sistemas ópticos. A continuación se explica cada condición que se utilizó en el programa, para mayor facilidad se asignó una letra a cada valor proporcionado por el usuario y también a los resultados del programa.

B = Distancia total del enlace (km), proporcionado por el usuario.

C = Número de Lambdas, proporcionado por el usuario.

D = Redundancia por Span o por enlace, proporcionado por el usuario.

E = Tipo de fibra a utilizar ya sea G.652 o G.655, proporcionado por el usuario.

F = B/80, # de span con decimales.

G = (MOD(B,80))/80, # decimal sobrante del span.

H = IF(AND((C<16),(G>=0.5)),1,0), si el número de Lambdas es menor a 16 y # decimal (G) es mayor o igual a 0.5 asigna 1, de lo contrario es 0.

I = IF(AND((H<=G),(F<=6.99)),INT(F),ROUND(F,0)), número de span resultante tomando en cuenta el resultado de la letra H, si H es mayor a G y F es menor o igual a 6 coloca el número entero que posee la letra F, de lo contrario aproxima al siguiente número entero de letra F.

J = IF(D="Span",I*2,I), es el número de span resultante tomando en cuenta si la redundancia es por Span se multiplica por 2 el valor de la letra I, de lo contrario si la redundancia es por enlace únicamente se coloca el valor de la letra I.

K = IF(I<=6, "EDFA","Raman"), amplificador sugerido y la condición en la cual se compara el valor de la casilla I y si este valor es igual o menor a 6 el resultado es EDFA, en caso contrario es Raman.

L = IF(AND(E="G.652"),((B/I)*0.23),((B/I)*0.19)), Pérdida total de atenuación según tipo de fibra (dB) del enlace total, es el valor de la pérdida de la fibra en dB, por lo que se compara los valores de la columna E, si son iguales al tipo de fibra G.652 se multiplica la distancia máxima del span por el coeficiente de atenuación para ese tipo de fibra, en caso contrario se multiplica la distancia máxima del span por el coeficiente de atenuación de la fibra G.655.

M = IF(AND(K="EDFA"),(17-L-(-28)),(27-L-(-36))), es la holgura (dB) de la señal con la que llega al receptor, si el valor de la casilla K es EDFA se toman los valores Tx y Rx del EDFA que son Tx = 17 dBm y Rx = -28 dBm, en caso de que la casilla tenga otro valor (ósea Raman) los valores son Tx = 27 dBm y Rx = -36 dBm.

N = Distancia total del enlace (km).

O = B/I Distancia Span máximo (km), tomando en cuenta 8 lambdas.

P = CONCATENATE(N,"(",ROUND(O,0),")"), Distancia máxima enlace (distancia máxima del span), se concatena los valores de las letras N y O.

Q = Holgura con que llega la señal al receptor con fibra G.652 (dB), con 8 lambdas, valores obtenidos de la letra M.

R = Holgura con que llega la señal al receptor con fibra G.655 (dB), con 8 lambdas, , valores obtenidos de la letra M.

S = Distancia total del enlace (km).

T = B/I Distancia Span máximo (km), tomando en cuenta 16 lambdas.

U = CONCATENATE(S,"(",ROUND(T,0),")"), Distancia máxima enlace (distancia máxima del span), se concatena los valores de las letras S y T.

V = Holgura con que llega la señal al receptor con fibra G.652 (dB), con 16 lambdas, valores obtenidos de la letra M.

W = Holgura con que llega la señal al receptor con fibra G.655 (dB), con 16 lambdas, valores obtenidos de la letra M.

6.2.3 Tabla de datos

Tabla XI. Resultados del programa, Método A.

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
200	8	Span	G.652	2.5	0.50	1	3	6	EDFA	15	30
225	8	Span	G.652	2.8125	0.81	1	3	6	EDFA	17	28
250	8	Span	G.652	3.125	0.13	0	3	6	EDFA	19	26
275	8	Span	G.652	3.4375	0.44	0	3	6	EDFA	21	24
300	8	Span	G.652	3.75	0.75	1	4	8	EDFA	17	28
325	8	Span	G.652	4.0625	0.06	0	4	8	EDFA	19	26
350	8	Span	G.652	4.375	0.38	0	4	8	EDFA	20	25
375	8	Span	G.652	4.6875	0.69	1	5	10	EDFA	17	28
400	8	Span	G.652	5	0.00	0	5	10	EDFA	18	27
425	8	Span	G.652	5.3125	0.31	0	5	10	EDFA	20	25
450	8	Span	G.652	5.625	0.63	1	6	12	Raman	17	46
475	8	Span	G.652	5.9375	0.94	1	6	12	Raman	18	45
500	8	Span	G.652	6.25	0.25	0	6	12	Raman	19	44
200	8	Span	G.655	2.5	0.50	1	3	6	EDFA	13	32
225	8	Span	G.655	2.8125	0.81	1	3	6	EDFA	14	31
250	8	Span	G.655	3.125	0.13	0	3	6	EDFA	16	29
275	8	Span	G.655	3.4375	0.44	0	3	6	EDFA	17	28
300	8	Span	G.655	3.75	0.75	1	4	8	EDFA	14	31
325	8	Span	G.655	4.0625	0.06	0	4	8	EDFA	15	30
350	8	Span	G.655	4.375	0.38	0	4	8	EDFA	17	28
375	8	Span	G.655	4.6875	0.69	1	5	10	EDFA	14	31
400	8	Span	G.655	5	0.00	0	5	10	EDFA	15	30
425	8	Span	G.655	5.3125	0.31	0	5	10	EDFA	16	29
450	8	Span	G.655	5.625	0.63	1	6	12	Raman	14	49
475	8	Span	G.655	5.9375	0.94	1	6	12	Raman	15	48
500	8	Span	G.655	6.25	0.25	0	6	12	Raman	16	47

6.2.4 Gráficas

A continuación se presenta las gráficas como resultado de la tabla de datos, además en la sección 6.2.2 ya se explicó el significado de cada letra.

Tabla XII. Valores utilizados para la figura 60.

N	O	P	Q	R
200	67	200(67)	30	32
225	75	225(75)	28	31
250	83	250(83)	26	29
275	92	275(92)	24	28
300	75	300(75)	28	31
325	81	325(81)	26	30
350	88	350(88)	25	28
375	75	375(75)	28	31
400	80	400(80)	27	30
425	85	425(85)	25	29
450	75	450(75)	46	49
475	79	475(79)	45	48
500	83	500(83)	44	47

Figura 61. Distancia máxima de un span vrs holgura con 8 lambdas.

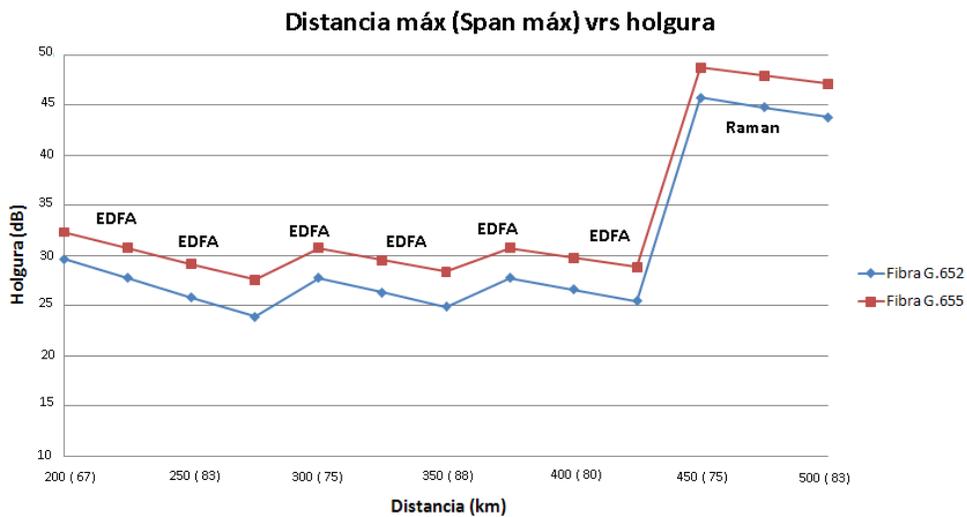
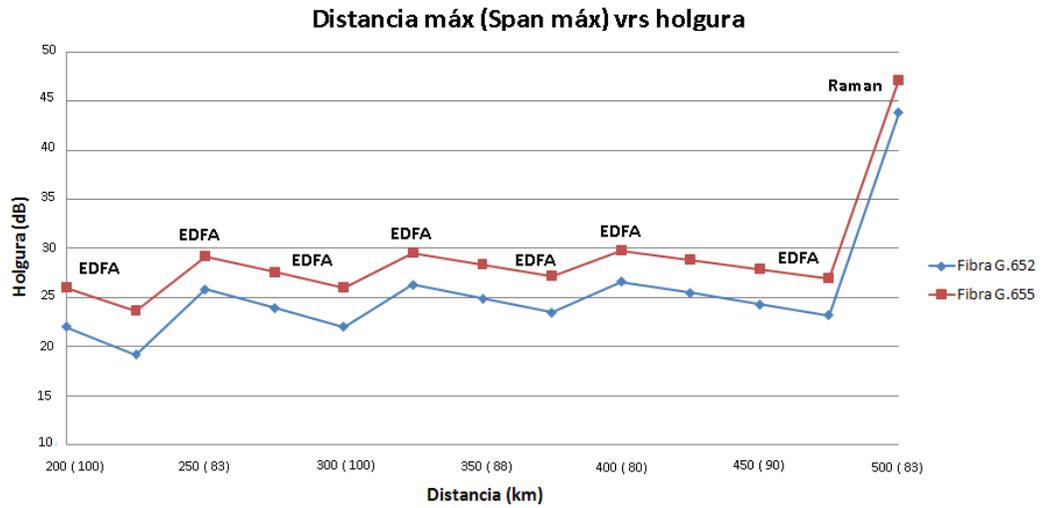


Tabla XIII. Valores utilizados para la figura 61.

S	T	U	V	W
200	100	200(100)	22	26
225	113	225(113)	19	24
250	83	250(83)	26	29
275	92	275(92)	24	28
300	100	300(100)	22	26
325	81	325(81)	26	30
350	88	350(88)	25	28
375	94	375(94)	23	27
400	80	400(80)	27	30
425	85	425(85)	25	29
450	90	450(90)	24	28
475	95	475(95)	23	27
500	83	500(83)	44	47

Figura 62. Distancia máxima de un span vrs holgura con 16 lambdas.



6.3 Resultados utilizando el Método B

6.3.1 Tabulación de datos

De acuerdo a lo que se describió en el punto anterior, el ingreso se realizará para que la recomendación sea un amplificador EDFA.

Figura 63. Ingreso de datos en el Método B.

Método B

Ingresar distancia máxima entre Spans (km)

Ingrese número de Spans a utilizar

Ingrese número de lambdas a utilizar

Ingresar tipo de redundancia (por Span o por Enlace)

Ingresar tipo de fibra (G.652 ó G.655)

Calcular

Luego de haber ingresado los datos, seleccionamos la opción de calcular y según ciertos criterios tomados por la experiencia, nos da los siguientes resultados.

Figura 64. Resultados de la matriz A.

Resultados Método B

Distancia total del enlace (km)	<input type="text" value="640"/>	Distancia máxima entre Spans (km)	<input type="text" value="80"/>
Número de Lambdas utilizadas	<input type="text" value="8"/>	Número de Spans	<input type="text" value="4"/>
Tipo de redundancia	<input type="text" value="Span"/>	# de Spans segun redundancia	<input type="text" value="8"/>
Tipo de fibra utilizada	<input type="text" value="G.652"/>		

Amplificador recomendado es el: **EDFA**

NOTA: Si redundancia es por Span duplica # spans, en caso contrario el # spans se mantiene. Por lo tanto la distancia total se duplica para el primer caso.

De acuerdo con el ejemplo anterior, ahora el ingreso se realizará para que la recomendación sea un amplificador Raman.

Figura 65. Ingreso de datos al Método B.

Método B

Ingresar distancia máxima entre Spans (km)

Ingrese número de Spans a utilizar

Ingrese número de lambdas a utilizar

Ingresar tipo de redundancia (por Span o por Enlace)

Ingresar tipo de fibra (G.652 ó G.655)

Calcular

Figura 66. Resultado Método B.

Resultados Método B

Distancia total del enlace (km)

Número de Lambdas utilizadas

Tipo de redundancia

Tipo de fibra utilizada

Distancia máxima entre Spans (km)

Número de Spans

de Spans segun redundancia

Amplificador recomendado es el: Raman

NOTA: Si redundancia es por Span duplica # spans, en caso contrario el # spans se mantiene. Por lo tanto la distancia total se duplica para el primer caso.

6.3.2 Explicación de las condiciones

Como se explicó en el Método A, el Método B consiste en lo mismo solo que tiene la diferencia que se piden más datos como se observó en los puntos anteriores. A continuación se explica cada condición que se utilizó en el programa, para mayor facilidad se asignó una letra a cada valor proporcionado por el usuario y también a los resultados del programa.

B = Distancia máxima entre Span (km), proporcionado por el usuario

C = Número de Lambdas, proporcionado por el usuario

D = Número de Spans, proporcionado por el usuario

E = Redundancia por Span o por Enlace, proporcionado por el usuario

F = Tipo de fibra a utilizar ya sea G.652 o G.655, proporcionado por el usuario

G = IF(E4="Span",D4*2,D4), # de span según redundancia y se toma el valor de la letra E y si el contenido dice "Span" inmediatamente el valor de la letra D se multiplica por dos, en caso contrario se queda únicamente con el valor D.

H = IF(AND(B>80,D>5),"Raman",IF(B>120,"Raman","EDFA")), Amplificador sugerido, el cual si el valor de B es mayor de 80 y D es mayor de 5 desplegará como sugerencia Raman, en caso contrario realiza otra comparación en la cual si B es mayor a 120 desplegará Raman sino será EDFA.

I = IF(AND(F4="G.652"),(B4*0.23),(B4*0.19)), Pérdida total de atenuación según tipo de fibra (dB) del enlace total, es el valor de la pérdida de la fibra en dB, por lo que se compara los valores de la columna F, si son iguales al tipo de fibra G.652 se multiplica la distancia máxima del span (letra B) por el coeficiente de atenuación para ese tipo de fibra, en caso contrario se multiplica la distancia máxima del span por el coeficiente de atenuación de la fibra G.655.

J = IF(AND(H4="EDFA"),(17-I4-(-28)),(27-I4-(-36))), Holgura con que llega la señal al receptor (dB), si el valor de la casilla K es EDFA se toman los valores Tx y Rx del EDFA que son Tx = 17 dBm y Rx = -28 dBm, en caso de que la casilla tenga otro valor (ósea Raman) los valores son Tx = 27 dBm y Rx = -36 dBm.

K = B*D, Distancia total del enlace (km)

L = Distancia máxima de un span (km), ingresado por el usuario.

M = Tipo de fibra a utilizar (G.652), con 8 lambdas, valor obtenido de la letra M.

N = Tipo de fibra a utilizar (G.655), con 8 lambdas, valor obtenido de la letra M.

O = Distancia máxima de un span (km), ingresado por el usuario.

P = Tipo de fibra a utilizar (G.652), con 16 lambdas, valor obtenido de la letra M.

Q = Tipo de fibra a utilizar (G.655), con 16 lambdas, valor obtenido de la letra M.

6.3.3 Tabla de datos

Tabla XIV. Resultados del programa, Método B.

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
40	8	4	Span	G.652	8	EDFA	9.2	35.8	160
80	8	4	Span	G.652	8	EDFA	18.4	26.6	320
120	8	4	Span	G.652	8	EDFA	27.6	17.4	480
160	8	4	Span	G.652	8	Raman	36.8	26.2	640
200	8	4	Span	G.652	8	Raman	46	17	800
40	17	4	Span	G.652	8	EDFA	9.2	35.8	160
80	17	4	Span	G.652	8	EDFA	18.4	26.6	320
120	17	4	Span	G.652	8	EDFA	27.6	17.4	480
160	17	4	Span	G.652	8	Raman	36.8	26.2	640
200	17	4	Span	G.652	8	Raman	46	17	800
40	8	4	Enlace	G.652	4	EDFA	9.2	35.8	160
80	8	4	Enlace	G.652	4	EDFA	18.4	26.6	320
120	8	4	Enlace	G.652	4	EDFA	27.6	17.4	480
160	8	4	Enlace	G.652	4	Raman	36.8	26.2	640
200	8	4	Enlace	G.652	4	Raman	46	17	800

40	17	4	Enlace	G.652	4	EDFA	9.2	35.8	160
80	17	4	Enlace	G.652	4	EDFA	18.4	26.6	320
120	17	4	Enlace	G.652	4	EDFA	27.6	17.4	480
160	17	4	Enlace	G.652	4	Raman	36.8	26.2	640
200	17	4	Enlace	G.652	4	Raman	46	17	800
40	8	4	Span	G.655	8	EDFA	7.6	37.4	160
80	8	4	Span	G.655	8	EDFA	15.2	29.8	320
120	8	4	Span	G.655	8	EDFA	22.8	22.2	480
160	8	4	Span	G.655	8	Raman	30.4	32.6	640
200	8	4	Span	G.655	8	Raman	38	25	800
40	17	4	Span	G.655	8	EDFA	7.6	37.4	160
80	17	4	Span	G.655	8	EDFA	15.2	29.8	320
120	17	4	Span	G.655	8	EDFA	22.8	22.2	480
160	17	4	Span	G.655	8	Raman	30.4	32.6	640
200	17	4	Span	G.655	8	Raman	38	25	800
40	8	4	Enlace	G.655	4	EDFA	7.6	37.4	160
80	8	4	Enlace	G.655	4	EDFA	15.2	29.8	320
120	8	4	Enlace	G.655	4	EDFA	22.8	22.2	480
160	8	4	Enlace	G.655	4	Raman	30.4	32.6	640
200	8	4	Enlace	G.655	4	Raman	38	25	800
40	17	4	Enlace	G.655	4	EDFA	7.6	37.4	160
80	17	4	Enlace	G.655	4	EDFA	15.2	29.8	320
120	17	4	Enlace	G.655	4	EDFA	22.8	22.2	480
160	17	4	Enlace	G.655	4	Raman	30.4	32.6	640
200	17	4	Enlace	G.655	4	Raman	38	25	800

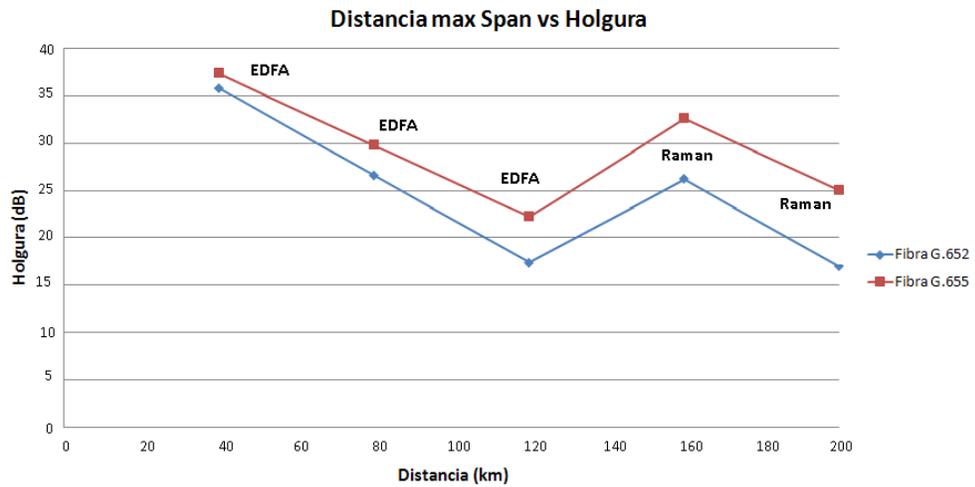
6.3.4 Gráficas

A continuación se presenta las gráficas como resultado de la tabla de datos, además en la sección 6.3.2 ya se explicó el significado de cada letra.

Tabla XV. Resultados reflejados en la figura número 66.

L	M	N	O	P	Q
40	35.8	37.4	40	35.8	37.4
80	26.6	29.8	80	26.6	29.8
120	17.4	22.2	120	17.4	22.2
160	26.2	32.6	160	26.2	32.6
200	17	25	200	17	25

Figura 67. Distancia máxima del Span vrs holgura.



6.4 Discusión resultados de los dos métodos

Luego de analizar los resultados obtenidos con los dos métodos y tomando en cuenta en que la distancia, número de spans, número de lambdas y si tiene redundancia por span o por enlace, a continuación una breve discusión de los resultados.

Método A

Los valores mostrados en la tabla XI muestran los diferentes resultados dadas ciertas condiciones y sobre todo se da a conocer la holgura con que la señal transmitida llega al receptor. La tabla XII y XIII son un resumen de los resultados de la tabla XI las cuales sirven para graficar (figura 61 y 62), en las dos figuras se muestran claramente que cuando conforme la distancia avanza se ve que la holgura disminuye y llega un punto en donde lo mas conveniente es utilizar Raman y por tal razón en la grafica se nota la gran diferencia cuando se llega a utilizar los amplificadores Raman. La diferencia entre las graficas 61 y 62 es que están utilizando en la primera 8 lambdas y en la segunda 16 lambdas.

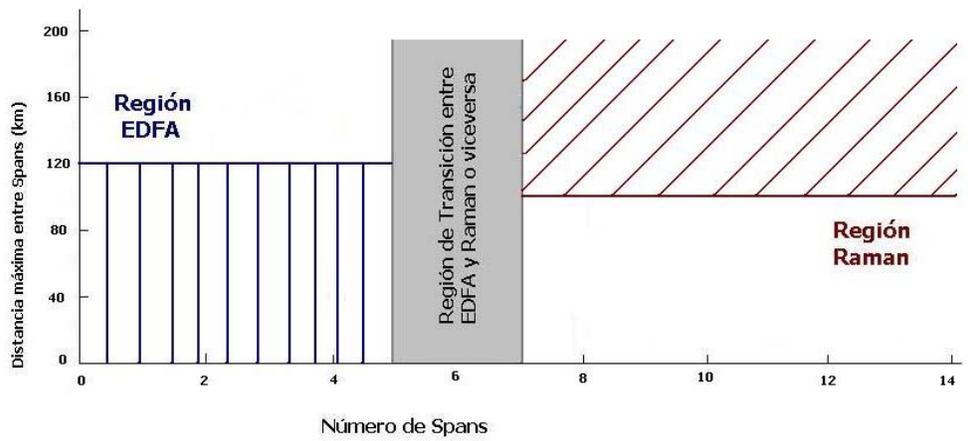
Método B

En la tabla XIV se muestra los valores para este método, los valores que ingresa no se repiten, únicamente la distancia máxima en kilómetros por span. En la figura 66 se puede observar que existe un punto donde la holgura es baja y por tal motivo lo conveniente es utilizar el amplificador Raman, aunque conforme avanza la distancia del span también se ve afectada la holgura de dicho amplificador.

Comparando las tres gráficas podemos apreciar que el amplificador Raman es una opción bastante viable para que el enlace de sistemas de comunicación óptica, aunque los EDFAs son bastante utilizados cuando las distancias a cubrir no sea muy grande.

En la figura 68 podemos observar las regiones que comprenden los dos amplificadores, esta basada en los numero de span versus distancia máxima entre spans, la zona azul representa la región EDFA, la zona roja presenta la región Raman y tenemos la zona gris en la cual consiste en que una pequeña variación en el diseño del enlace podría caer a cualquiera a la región EDFA o a la de Raman.

Figura 68. Gráfica demostrativa de las regiones para EDFA y Raman.



CONCLUSIONES

1. Es fundamental el uso de amplificadores de tipo óptico-óptico dentro de los sistemas de comunicaciones ópticas. Estos han sido la solución para los sistemas DWDM, ya que evitan la necesidad de la conversión de Óptico-Eléctrico-Óptico.
2. El tipo de fibra óptica que se usará en un enlace óptico en la cual se utiliza la tecnología DWDM, es muy importante ya que existe varios tipos de fibra, pero no todas son óptimas para esta tecnología, por lo que el tipo de fibra G.652 y G.655 son las más utilizadas por sus propiedades y características, sobre todo por su bajos coeficientes de atenuación y de dispersión.
3. En la actualidad existe una variedad de amplificadores ópticos, en los cuales se incluyen los que son tipo eléctrico-óptico y el tipo óptico-óptico, nos enfocamos únicamente en dos amplificadores que son los más utilizados para el diseño de un sistema de comunicación óptico en DWDM. Adicionalmente de los dos tipos que se investigó, están los siguientes amplificadores como TDFA, PDFA, YDFA, PFA, SOA, SLA.
4. Se observó que los amplificadores ópticos EDFA tienen una región de ganancia que no es muy plana, esto afecta a que no todas las longitudes de onda tendrán exactamente la misma ganancia, en cambio para los amplificadores Raman una de sus cualidades es que poseen una región de ganancia bastante plana, por lo que todas las longitudes de onda de la señal se amplifican.

5. Dadas ciertas condiciones y comparando resultados obtenidos, se puede establecer que el amplificador Raman es el mas indicado cuando los números de saltos es mayor a seis y que la distancia máxima entre ellos es mayor a 120 kilómetros. Ahora bien es más conveniente utilizar el amplificador EDFA cuando el número de saltos es menor de seis y la distancia máxima entre saltos no sea mayor a 120 kilómetros. Por lo que hace pensar que para el diseño de un sistema óptico en nuestro país, el costo-efectividad del mismo no se vería afectado si se utiliza EDFA o Raman, ya que los enlaces en el país no serian de miles de kilómetros.

6. Se propuso dos métodos a utilizar basándose en los criterios establecidos en la investigación, los cuales uno sigue la recomendación de la ITU-T y el otro es más personalizado, ya que el usuario con base a sus necesidades puede interactuar con el ingreso de valores y comparar los diferentes resultados.

RECOMENDACIONES

1. En los últimos años se ha mejorado mucho en lo que se refiere a la fibra óptica, antes la diferencia entre la fibra G.652 y G.655 era bastante grande en cuanto a costo se refiere, hoy en día esa diferencia se ha acortado y por características técnicas es mas conveniente utilizar la fibra G.655 en el diseño de un enlace óptico.
2. En la actualidad existen varios tipos de amplificadores, aunque los mas comúnmente utilizados son los de tipo óptico-óptico, pero ya queda a decisión de la persona encargada del diseño del enlace utilizar los amplificadores ópticos que mas favorezca para un sistema óptico eficiente.
3. En el diseño de un enlace de sistema óptico hay que tomar muy en cuenta la atenuación, pero sobre todo la dispersión ya que este es el verdadero factor que afecta a la señal transmitida.
4. En Guatemala no existe enlaces de miles de kilómetros por ser un país pequeño, pero si existen proyectos en los cuales abarcan varios países de la región en el cual si se puede aplicar los criterios que fueron mencionados a lo largo de este trabajo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Kartalopoulos, Stamatios V. **Introduction to DWDM technology**. United States of America: Editorial Wiley-Interscience, 2000.
2. Dutton, Harry. **Understanding Optical Communications**. Primera Edición. United States of America: s.e. 1998.
3. <http://en.wikipedia.org> (enero 2009)
4. <http://www.maths.leeds.ac.uk/~grant/es/temas.html> (enero 2009)
5. <http://ww.ces.newt> (enero 2009)
6. J.Franz& V. Jain., **Optical Communication Systems**, Academic Wiley, 1996
7. Gómez Barrientos, Ricardo Arturo Estudio y análisis de pérdidas en redes de fibra óptica basadas en el estándar sonet/sdh y su evolución hacia DWDM. Trabajo de graduación Ing. Electrónica, universidad de Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, 2007. 123 pp.
8. De León Guerrero, Rubén y Ruiz Litwinski, David Nicolas. **Comunicaciones Ópticas**. 2005.
9. L.D. Garrett y otros. **Optical Fiber Conference 2000**, Baltimore. March 2000.

10. O. Gautheron, **Proceeding of the Optical Fiber Conference 2000**, Baltimore. March 2000.
11. Gualda Manzano, Emilio José Optimización de las prestaciones de enlaces ópticos submarinos de gran capacidad y larga distancia mediante el control de la dispersión. Trabajo de graduación Doctoral Ing. en Telecomunicaciones, Universidad técnica de Cataluña España, Escuela técnica superior de ingeniería de telecomunicaciones de Barcelona. 2006. 170 pp.
12. Shien-Kuei Liaw, Investigate C+L Band EDFA/Raman Amplifiers by Using the Same Pump Lasers.
13. González Herráez, Miguel Desarrollo de técnicas no lineales para la medida de la distribución longitudinal de dispersión cromática en fibras ópticas monomodo. Trabajo de graduación Doctoral Ing. de Telecomunicación España, Universidad Politécnica de Madrid, Facultad de Ingeniería, 2004. 160 pp.
14. Valencia Uribe, Juan Felipe Y Jaramillo Mora, Walter Joussep Equipos Ópticos Para Redes WDM Adaptables A Técnicas Traffic Grooming. Trabajo de graduación Ingeniería Electrónica Bolivia, Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Electrónica, 2008. 130 pp.