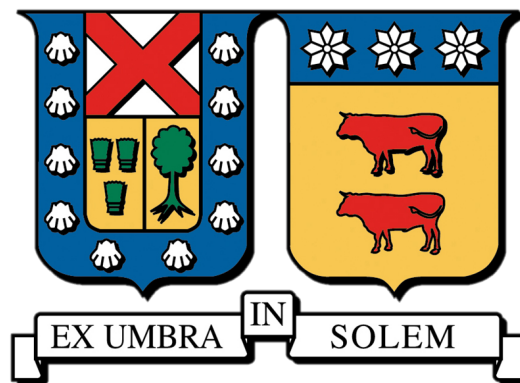


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

VALPARAÍSO - CHILE



**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE AMPLIFICADORES
ÓPTICOS EN REDES ÓPTICAS SDM”**

CHRISTIAN ALFONSO PFLAUMER AGUILERA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ELECTRÓNICO

PROFESOR GUÍA: RICARDO OLIVARES VÉLIZ

PROFESOR CO-REFERENTE: MARCELO SOTO HERNÁNDEZ

MARZO-2023

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS EN REDES ÓPTICAS SDM”

Christian Alfonso Pflaumer Aguilera

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico.

Profesor guía: **Dr. Ricardo Olivares Véliz**

Marzo 2023

Resumen

En este trabajo se estudia el comportamiento de amplificadores ópticos SDM (Space Division Multiplexing) a través de implementación y simulación en computador de modelos matemáticos de amplificadores ópticos FM-EDFAs (Few-Mode Erbium Doped Fiber Amplifiers) y FM-DFRAs (Few-Mode Distributed Fiber Raman Amplifiers).

Se analiza el comportamiento modal de estos amplificadores, primero individualmente, caracterizando su desempeño en términos de espectro de ganancia, ganancia dependiente del modo y figura de ruido, para parámetros de diseño característicos, y diferentes esquemas de bombeo. Para el caso del FM-EDFA, se introduce un filtro ecualizador de ganancia inter etapa, diseñado a través de un proceso de optimización, con el propósito de conseguir un espectro de ganancia plano. Seguidamente, se disponen cascadas de amplificadores de una misma clase, simulando un enlace de comunicaciones, y se analiza su comportamiento.

Los resultados obtenidos muestran la importancia de la ecualización de ganancia, la dependencia modal de la ganancia y el comportamiento del ruido, para bombeo directo y reverso. Este comportamiento se acentúa al disponer estos amplificadores en una cascada, lo que obliga a un buen diseño para conseguir un comportamiento aceptable.

Palabras Clave. Amplificadores ópticos, multiplexación por división de modos, EDFA multi-modo, amplificador Raman distribuido multi-modo, filtro ecualizador de ganancia inter etapa.

“DESIGN AND SIMULATION OF OPTICAL AMPLIFIERS IN SDM OPTICAL NETWORKS”

Christian Alfonso Pflaumer Aguilera

Final Project Report towards the fulfillment of the Ingeniero Civil Electrónico degree.

Advisor: **Dr. Ricardo Olivares Véliz**

Marzo 2023

Abstract

This work studies the behavior of SDM (Space Division Multiplexing) optical amplifiers through the implementation and computer simulation of mathematical models of optical amplifiers FM-EDFAs (Few-Mode Erbium Doped Fiber Amplifiers) and FM-DFRAs (Few-Mode Distributed Fiber Raman Amplifiers).

The modal behavior of these amplifiers is analyzed, first separately, characterizing their performance in terms of gain spectrum, mode-dependent gain, and noise figure, for characteristic design parameters, and different pumping schemes. For the FM-EDFA case, a gain equalization interstage filter is introduced, designed through an optimization process, with the purpose of achieving a flat gain spectrum. Subsequently, this amplifier is arranged in a cascade, simulating a communications link, and its behavior is observed.

The results obtained show the importance of the gain equalization, the modal dependence of the gain and the behavior of the noise, for forward and reverse pumping. This behavior is accentuated by arranging these amplifiers in a cascade, which requires a good design to achieve acceptable behavior.

Keywords. Optical amplifiers, mode division multiplexing, multi-mode EDFA, multi-mode distributed Raman amplifier, inter stage gain equalizer filter.

Agradecimientos

A mi familia: mis abuelos, Poncho y Keko, que siempre han sido como mis padres; al chiki, mi hermano, mis tíos Carito y Sergio, y mi papá, que siempre me han dado todo su apoyo; a mi tía, Putzi y su familia que pudieron brindarme ese calor familiar en Valparaíso; a mis suegros, que me incorporaron con mucho cariño a la familia. A mi mamá, que tanto me apoyó en el inicio de este viaje, y se que estará, muy orgullosa, esperando al final.

A mis amigos, los nuevos y los de siempre. La familia que uno escoge.

A Panchi, mi mejor amiga y compañera de vida, que siempre está, en las buenas y en las malas, con todo su amor.

Tabla de Contenidos

1	Introducción	1
1.1	Contextualización : Crisis de las comunicaciones ópticas	1
1.2	Estado del arte: Soluciones existentes	2
1.3	Objetivos	5
1.3.1	Objetivo general	5
1.3.2	Objetivos específicos	5
1.4	Distribución de los capítulos	5
2	Marco Teórico de los amplificadores EDFA y DFRA	7
2.1	Teoría del Amplificador de Fibra Dopada con Erblio	7
2.1.1	Niveles energéticos	8
2.1.2	Sección transversal de espectros de emisión y absorción	9
2.2	Modelado matemático del EDFA	11
2.2.1	Ecuaciones de transición y densidad poblacional de Iones	11
2.2.2	Ecuaciones de Propagación de Potencia	12
2.2.3	Factor de superposición	13
2.2.4	Modelado de EDFA multi-modo	13
2.3	Teoría del Amplificador Raman Distribuido	18
2.3.1	Esparcimiento Raman	18
2.4	Modelado Matemático del DFRA	24
2.4.1	Ecuaciones de Propagación	24
2.4.2	Ganancia on-off	25
2.4.3	Ruido ASE	25
2.4.4	Modelado de DFRA en sistema multi-modo	26
2.5	Conclusión	28
3	Caracterización y validación de modelos matemáticos de amplificadores ópticos EDFA y DFRA mediante simulación numérica	30

3.1	Validación del EDFA	30
3.1.1	Bombeo en modo LP01	30
3.1.2	Bombeo en modo LP12a	40
3.1.3	Ajuste de los parámetros en casos mostrados anteriormente	48
3.2	Caracterización del EDFA	52
3.2.1	Ecualización de ganancia	56
3.3	Validación del DRFA	60
3.3.1	Primer caso: Bombeo Backward	60
3.3.2	Segundo caso: Bombeo Bidireccional	66
3.4	Conclusión	71
4	Estudio de Casos	73
4.1	Amplificadores EDFA en Cascada	73
4.2	EDFA con bombeo Backward	80
4.3	Amplificador Raman: Comparación de métodos de bombeos	86
4.4	Conclusión	91
5	Conclusiones	93

Lista de Tablas

3.1	Parámetros de fibra en EDFA	31
3.2	Parámetros de las señales de entrada	31
3.3	Parámetros de fibra en EDFA	40
3.4	Parámetros de las señales de entrada	40
3.5	Parámetros ajustados de para el primer caso	49
3.6	Parámetros ajustados para el segundo caso	49
3.7	Parámetros de la fibra dopada.	52
3.8	Parámetros de la fibra Raman.	60
3.9	Parámetros de las señales de entrada	60
3.10	Parámetros de la fibra Raman.	66
3.11	Parámetros de las señales de Entrada	66
4.1	Parámetros de fibra de los EDFA	74
4.2	Parámetros de las señales de entrada	75
4.3	Parámetros de fibra en EDFA	81
4.4	Parámetros de las señales de entrada	81
4.5	Parámetros de la fibra Raman.	87
4.6	Parámetros de las señales de entrada.	87

Lista de Figuras

1.1	Evolución de la capacidad de transmisión.[1]	2
1.2	Estructuras de diferentes tipos de fibras para SDM: (a) Fibra monomodo; (b) Fibra de pocos modos (FMF); (c) Fibra multimodo (MMF); (d) Fibra multinúcleo (MCF); (e) Fibra multinúcleo de pocos modos (MC-FMF). [2] [3]	3
2.1	Diagrama simplificado de niveles energéticos de Er^{3+} en sílice	8
2.2	Espectro de emisión y absorción típico de fibra dopada con Erblio	10
2.3	Diagramas energéticos de esparcimientos Rayleigh, Stökes y Anti-Stökes.	19
2.4	Diagrama de Esparcimiento Raman estimulado.	20
2.5	Ganancia Raman para fibra monomodo.	21
2.6	Distintas configuraciones de bombeo para DRFA.	22
2.7	Coeficiente Rayleigh backscattering η vs longitud de onda.	28
3.1	Distribución longitudinal de la potencia de bombeo.	32
3.2	Distribución longitudinal de las densidades poblacionales de Iones.	33
3.3	Comparación de ganancias para los modos LP01 y LP11a.	34
3.4	Distribución de la potencia de señal a lo largo del EDFA en el modo LP01.	35
3.5	Distribución de la potencia de señal a lo largo del EDFA en el modo LP11a.	35
3.6	Distribución de la potencia de ruido ASE a lo largo del EDFA en el modo LP01.	36
3.7	Distribución de la potencia de ruido ASE a lo largo del EDFA en el modo LP11a.	37
3.8	Distribución de la potencia de ruido ASE total a lo largo del EDFA en el modo LP01.	38
3.9	Distribución de la potencia de ruido ASE total a lo largo del EDFA en el modo LP11a.	38
3.10	Figura de ruido del EDFA para los modos LP01 y LP11.	39
3.11	Distribución longitudinal de la potencia de bombeo.	41
3.12	Distribución longitudinal de las densidades poblacionales de iones.	42
3.13	Distribución longitudinal del porcentaje de iones en estado excitado.	42
3.14	Comparación de ganancias para los modos LP01 y LP11a.	43
3.15	Distribución de la potencia de señal a lo largo del EDFA en el modo LP01.	44
3.16	Distribución de la potencia de señal a lo largo del EDFA en el modo LP11a.	44

3.17	Distribución de la potencia de ruido ASE a lo largo del EDFA en el modo LP01. . .	45
3.18	Distribución de la potencia de ruido ASE a lo largo del EDFA en el modo LP11a. .	46
3.19	Distribución de la potencia de ruido ASE Total a lo largo del EDFA en el modo LP01.	47
3.20	Distribución de la potencia de ruido ASE Total a lo largo del EDFA en el modo LP11a.	47
3.21	Figura de ruido del EDFA para los modos LP01 y LP11a.	48
3.22	Caso 1: OSNR para los modos LP01 y LP11a.	50
3.23	Caso 1: Figura de ruido para los modos LP01 y LP11a.	51
3.24	Caso 2: OSNR para los modos LP01 y LP11a.	51
3.25	Caso 2: Figura de ruido para los modos LP01 y LP11a.	52
3.26	Ganancia vs largo del EDFA, para diferentes potencias de bombeo.	53
3.27	Ganancia vs potencia de bombeo, para diferentes largos del EDFA.	54
3.28	Potencia de salida vs potencia de entrada al EDFA de 5 metros de longitud, utilizando 100 mW de potencia de bombeo.	55
3.29	Potencia de salida vs potencia de entrada al EDFA de 10 metros de longitud, utilizando 200 mW de potencia de bombeo.	55
3.30	Filtro de ecualización inter etapa.	56
3.31	Comparación de ganancias al utilizar el filtro ecualizador (GEF).	57
3.32	Función de transferencia del filtro ecualizador.	58
3.33	Relación señal a ruido óptica ecualizada.	59
3.34	Esquema del caso 1 de la validación del amplificador Raman	61
3.35	Distribución longitudinal de la potencia de bombeo.	61
3.36	Coeficiente de ganancia Raman utilizado.	62
3.37	Comparación de Ganancias On-Off.	63
3.38	Distribución longitudinal de la potencia de señal.	64
3.39	Distribución longitudinal de la potencia de ruido ASE.	65
3.40	Distribución longitudinal de la OSNR.	65
3.41	Esquema del caso 2 de la validación del amplificador Raman	66
3.42	Coeficiente de ganancia Raman utilizado.	67
3.43	Distribución longitudinal de la potencia de bombeo.	68
3.44	Comparación de ganancias On-Off.	68
3.45	Distribución longitudinal de la potencia de señal.	69
3.46	Distribución longitudinal de la potencia de ruido ASE.	70
3.47	Distribución longitudinal de la OSNR.	70
3.48	Distribución espectral de la figura de ruido	71
4.1	Configuración simulada de EDFAs en cascada.	73

4.2	Coeficiente de atenuación respecto a longitud de onda	74
4.3	Ganancia de potencia a la salida de cada uno de los EDFAS en la cascada, para el modo LP01	75
4.4	Ganancia de potencia a la salida de cada uno de los EDFAS en la cascada, para el modo LP11a	76
4.5	Potencia de señal a lo largo de todo el sistema para el canal de longitud de onda 1555 nm	77
4.6	Distribución espectral de las potencias de salida de cada EDFA para el modo LP01	78
4.7	Distribución espectral de las potencias de salida de cada EDFA para el modo LP11a	78
4.8	Relación señal a ruido óptica a la salida de cada amplificador para el modo LP01 . .	79
4.9	Relación señal a ruido óptica a la salida de cada amplificador para el modo LP11a .	79
4.10	Figura de ruido del primer Span para los modos LP01 y LP11a	80
4.11	Distribución longitudinal de la potencia de bombeo para las configuraciones Forward y Backward	82
4.12	Espectro de ganancias de los modos LP01 y LP11a	82
4.13	Distribución longitudinal de la potencia en el modo LP01	83
4.14	Distribución longitudinal de la potencia en el modo LP11a	84
4.15	Relación señal a ruido óptica a la salida de los amplificadores.	85
4.16	Figura de ruido de EDFA en configuraciones Forward y Backward	86
4.17	Ganancias On-Off para modo LP11a	88
4.18	Ganancias On-Off para modo LP21a	88
4.19	OSNR a la salida del amplificador para modo LP11a	89
4.20	OSNR a la salida del amplificador para modo LP21a	90
4.21	Figura de ruido del amplificador para modo LP11a	90
4.22	Figura de ruido del amplificador para modo LP21a	91

Glosario de Términos

ASE	Amplified Spontaneous Emission
DMG	Differential Mode Gain
DFA	Doped Fiber Amplifier
DRFA	Distributed Raman Fiber Amplifier
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FMF	Few Mode Fiber
LP	Linearly Polarized
MCF	Multi-Core Fiber
MDG	Mode Dependent Gain
MDM	Mode Division Multiplexing
MMF	Multi Mode Fiber
NF	Noise Figure
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
SDM	Space Division Multiplexing
SRS	Stimulated Raman Scattering
WDM	Wave Division Multiplexing

Capítulo 1

Introducción

La fibra óptica, como canal de comunicación, ha llegado a ser la base de los sistemas modernos de comunicaciones gracias a sus diversas propiedades, tales como la inmunidad a la interferencia electromagnética, gran capacidad de ancho de banda y su capacidad de transmisión de señales ópticas con pérdidas ultra-bajas (inferiores a 0,2 dB/km) [4]. Todo esto en varias ventanas del espectro óptico conocidas como Bandas S, C y L, que cubren entre los 1470 hasta los 1600 nm.

El desarrollo de fibras cada vez más eficientes ha permitido un aumento exponencial de las velocidades de transmisión, logrando alcanzarse los límites físicos de la fibra óptica monomodo, con velocidades de transmisión del orden de las decenas de Tb/s . Por esta misma razón, si no se actúa en respuesta a la cada vez mayor demanda de ancho de banda, se alcanzará el nombrado *capacity crunch* [1]

1.1 Contextualización : Crisis de las comunicaciones ópticas

Según la teoría de la información deducida por Claude Shannon, el límite teórico de la fibra óptica monomodo está definido por el ruido presente en las transmisiones [5]. La Figura 1.1 ilustra cómo este límite ha reducido la velocidad de crecimiento de la capacidad de transmisión que se venía siguiendo en las pasadas décadas. Esto ha sido alcanzado gracias a la aparición de tecnologías como el EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), el uso conjunto de multiplexación por división de longitud de onda (WDM: Wavelength Division Multiplexing), multiplexación por división de polarización (PDM: Polarization division multiplexing), formatos de codificación cada vez más eficientes, etc.

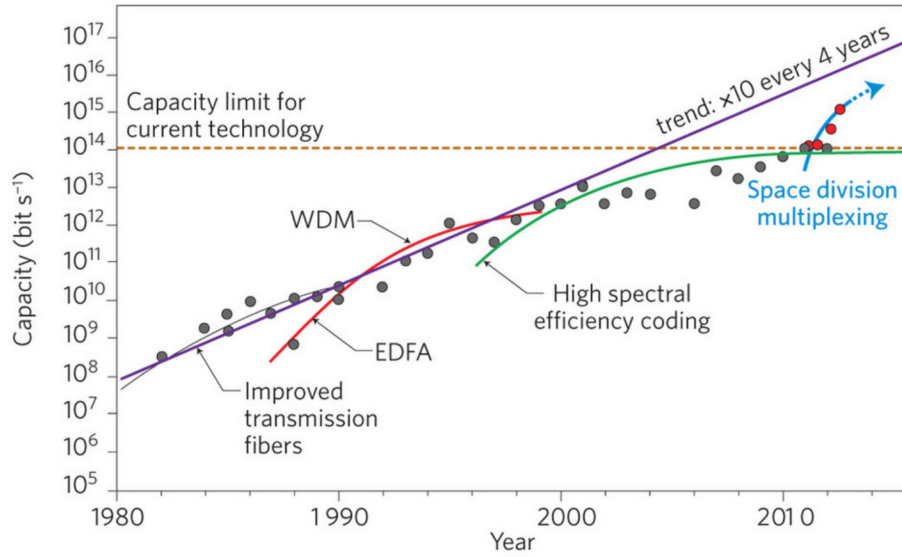


Figura 1.1: Evolución de la capacidad de transmisión.[1]

1.2 Estado del arte: Soluciones existentes

Para lidiar con estas limitaciones físicas, se propone como principal solución el envío de datos de forma paralela, introduciendo una nueva dimensión: la multiplexación por división espacial (SDM: Space Division Multiplexing). Esta nueva tecnología pretende implementar multiplexación por división de modo (MDM: Mode Division Multiplexing) y fibras multinúcleo en conjunto a todo el abanico de tecnologías ya existentes en la red. Estas tecnologías emergentes otorgan a la fibra óptica una oportunidad excepcional para ampliar su capacidad, logrando obtener velocidades de transmisión del orden de los Pb/s [6].

Fibras SDM

Para comprender mejor el alcance de esta nueva tecnología, que se escala al dominio espacial, es útil analizar los tipos de fibras que se están desarrollando. La Figura 1.2 muestra, a modo de comparación, los nuevos tipos de fibras que pueden ser implementadas, donde el color amarillo representa el núcleo de la fibra y en celeste se representa el revestimiento. En la Figura, las fibras monomodo (a), son las ampliamente utilizadas actualmente para la transmisión de datos a nivel mundial, mientras que las fibras de pocos modos (FMF: Few-Mode Fiber) (b) y las fibras multinúcleos (MCF: Multi-Core Fiber) (d) son las fibras más llamativas para la implementación SDM junto a su combinación, MC-FMF (e).

En fibras multinúcleo (MCF), la cantidad y disposición de estos para evitar cross-talk entre núcleos vecinos es un tema ampliamente estudiado actualmente, que no se revisará en este trabajo

[7]. Además, otras fibras como las fibras multimodo (MMF: Multi-Mode Fiber convencional o fibra de núcleo hueco también son atractivas en los estudios de SDM.

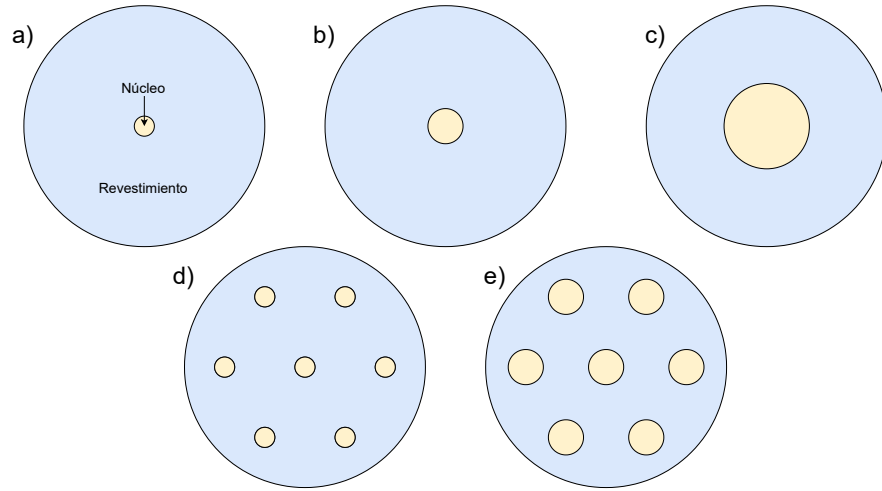


Figura 1.2: Estructuras de diferentes tipos de fibras para SDM: (a) Fibra monomodo; (b) Fibra de pocos modos (FMF); (c) Fibra multimodo (MMF); (d) Fibra multinúcleo (MCF); (e) Fibra multinúcleo de pocos modos (MC-FMF). [2] [3]

Multiplexación por División Espacial en Fibras Multimodo

Una solución SDM es multiplexar canales creados a partir de modos ópticos guiados en MMF o en FMF, a esto se le llama MDM. Esos modos pueden, en principio, ser cualquier conjunto de modos ortogonales, tales como modos linealmente polarizados (LP), de momento angular orbital (OAM) [8], etc. Entre los diversos tipos de modos, los modos LP en fibras débilmente guiadas son ampliamente utilizados, por lo que este trabajo se enfoca en ellos.

El mayor problema de las fibras multimodo es la dispersión modal, que provoca un ensanchamiento del pulso de señal limitando las comunicaciones a largas distancias. Es por esto que se ha propuesto el uso de fibras de pocos modos, fibras en las que solo se puede guiar un número restringido de modos y este número está determinado por la frecuencia normalizada, el número V , que asocia el tamaño del núcleo de la fibra y la apertura numérica (NA) con la longitud de onda de operación [9].

Sin embargo, las fibras de pocos modos no están exentas de complicaciones. El mayor problema a solucionar, para lograr su implementación, surge del hecho que los diferentes modos ópticos comparten el mismo núcleo de fibra para transmitirse, esto es el cross-talk intermodal, que se produce durante la propagación y amplificación de la señal.

Multiplexación por División Espacial en Fibras Multinúcleo

Una segunda solución SDM es ver la fibra óptica como un sistema de rutas múltiples, permitiendo así la transmisión de varios, por decir N , canales independientes, cada cual capaces de transportar múltiples canales WDM, que llevan información diferente. Estas N rutas distintas multiplican así la capacidad de SMF por un factor de N .

En una fibra con suficiente separación entre núcleos, idealmente no existe interacción entre las señales de cada uno, pero en la realidad el principal problema que obstaculiza la cantidad de núcleos que se integran, y el rendimiento de la transmisión de larga distancia con MCF, es el cross-talk entre los núcleos. Para hacer frente a esto, se han investigado técnicas como la asistencia por huecos de aire o perfiles de índice de refracción asistido por trincheras para reducir el cross-talk entre núcleos vecinos [10].

Amplificadores Ópticos SDM

Las transmisiones SDM de larga distancia, al igual que los actuales sistemas de transmisión SMF, necesitan amplificadores ópticos para compensar las inevitables pérdidas de las fibras ópticas basadas en sílice. En consecuencia, la amplificación de la señal en la transmisión de larga distancia es un tema clave que debe resolverse para implementar sistemas SDM. Es por esto que, de manera análoga a los enlaces de transmisión SMF, se necesitan amplificadores situados periódicamente a lo largo de un enlace para compensar las pérdidas de cada tramo.

Entre las diversas tecnologías de amplificadores ópticos, dos de ellas destacan como candidatas para su implementación en los sistemas SDM. Por un lado, se tienen los amplificadores de fibra dopada (DFA: Doped Fiber Amplifiers), que ofrecen ventajas en términos de alta ganancia de señal en un tramo corto de fibra, del orden de unos pocos metros, a costa de una figura de ruido (NF: Noise Figure) más alta. Dentro de estos resaltan los EDFAs (Erbium Doped Fiber Amplifier) por su espectro de ganancia en la banda C. Por otro lado, se tienen los amplificadores Raman distribuidos (DRA: Distributed Raman Amplifiers), que, a diferencia del amplificador de fibra dopada, producen ganancia a lo largo de largas distancias y en un ancho de banda mayor. Estos amplificadores, si bien tienen ganancias mucho menores a los EDFAs, presentan mejores NF y son mucho más versátiles a la hora de aplanar los espectros de ganancia. En el contexto de SDM, para ambos amplificadores se han demostrado y desarrollado dispositivos basados en MC-EDF, FM-EDF y MC-FM-EDF.

Uno de los problemas a solucionar en la amplificación en sistemas SDM, es la ganancia dependiente del modo (MDG: Mode Dependent Gain) o la ganancia de modo diferencial (DMG: Differential Mode Gain) si se compara la MDG entre modos.

Es por lo anterior que se han estudiado dos métodos para aminorar estas diferencias en los EDFAs y uno para los Raman. Por un lado, inspirándose en el dopaje en forma de anillo, los investigadores han adaptado una variedad de perfiles de dopaje, llegando a proponerse fibras cuyos perfiles contienen más de 10 anillos concéntricos [11]. Por otro lado, se ha propuesto controlar la DMG ajustando la distribución de potencia de cada modo de bombeo [12]. Es sobre esta última solución en la cual se basa la sección de EDFAs de este trabajo.

En cuanto a los amplificadores Raman, al no tener la libertad de modificar el dopaje de la fibra, ya que no se utilizan fibras especiales, sólo es posible disminuir la DMG ajustando la distribución de potencia de cada modo de bombeo [13]. Esto es, de cierta forma, similar al método que se realiza para aplanar el espectro de ganancia, en el cual lo que se ajusta es la potencia de cada canal de bombeo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Estudiar el comportamiento de amplificador FM-EDFAs (Few-Mode Erbium Doped Fiber Amplifiers) y FM-DFRAs (Few-Mode Distributed Fiber Raman Amplifiers), a través de implementación y simulación en computador de modelos matemáticos de estos amplificadores.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Describir los modelos matemáticos que gobiernan del comportamiento modal de estos amplificadores, para su posterior implementación en computador y simulación numérica.
2. Implementar, de forma modular, estos modelos matemáticos en lenguaje de programación Matlab para el desarrollo del simulador.
3. Caracterizar los amplificadores en término de sus parámetros más importantes, tales como ganancia espectral, ganancia dependiente del modo y figura de ruido.
4. Estudiar casos de interés tales como cascadas de estos amplificadores.

1.4 Distribución de los capítulos

La distribución de los siguientes capítulos sigue el siguiente orden: el Capítulo 2 está dividido en dos partes: la primera describe al EDFA mientras que la segunda al DFRA. Ambas siguen la misma estructura, comenzando con la exposición de la teoría que describe los fenómenos físicos

detrás de la amplificación. Luego se detalla el modelo matemático, comenzando con un modelo monomodo sobre el cual se hacen los ajustes necesarios, debidamente justificados, para llegar al modelo multimodo. En el Capítulo 3 se presenta la caracterización y validación, mediante simulación, de ambos amplificadores ópticos. El Capítulo 4 presenta los resultados obtenidos durante el estudio de dos casos de interés. Por último, el Capítulo 5 presenta las conclusiones extraídas del trabajo junto al trabajo futuro propuesto.

Capítulo 2

Marco Teórico de los amplificadores EDFA y DFRA

Durante la primera parte de este capítulo, se revisa la teoría básica del EDFA, discutiendo los niveles energéticos de los iones de Erblio trivalente (Er^{3+}) en el sílice y sus propiedades radiativas. Luego, se presenta el modelo convencional, para fibras monomodo, del EDFA con el conjunto de ecuaciones acopladas que describen la amplificación de la señal, la absorción del bombeo y la generación de emisión espontánea amplificada (ASE), junto a las ecuaciones de tasa poblacional de iones de Er^{3+} . Finalmente, se describe cómo se modifica este modelo para adaptarse al caso de amplificación basada en fibras multimodo [10].

Posteriormente, en la segunda parte del capítulo, y siguiendo el mismo orden utilizado anteriormente, se describe la teoría básica del amplificador Raman Distribuido, detallando el fenómeno del esparramiento Raman. Luego, se presenta un modelo matemático simple que describe la evolución de potencias en un DFRA, sobre el cual se agrega el efecto del ruido ASE y del esparramiento Rayleigh, para finalmente presentar el modelo multi-modo con todos estos fenómenos.

2.1 Teoría del Amplificador de Fibra Dopada con Erblio

La amplificación en fibras ópticas dopadas se basa en el efecto de emisión estimulada y necesitan de un bombeo óptico externo para permitir la inversión de población en el medio, que consta de iones activos introducidos en el vidrio o cristal de la fibra. En la gran mayoría de casos de este tipo de amplificadores de fibra óptica, estos iones activos son elementos de tierras raras, tales como Erblio, Iterbio, Tulio, etc. Entre estos elementos, el Erblio es particularmente adecuado para comunicaciones de fibra óptica que operan en la banda C y banda L, debido a que el Erblio absorbe

eficientemente fotones de bombeo de 980 nm o 1480 nm, emitiendo posteriormente fotones menos energéticos en el rango de longitudes de onda entre 1500 y 1600 nm, cubriendo las bandas C y L. La emisión puede ser espontánea o estimulada, siendo esta última, el mecanismo esencial de la amplificación de fotones de señal, en dirección de copropagación o contrapropagación, en amplificadores de fibra dopada con tierras raras.

2.1.1 Niveles energéticos

El diagrama energético de la Figura 2.1 ilustra, de forma simplificada, las diferentes rutas de excitación a través del bombeo de 980 nm y 1480 nm. Por un lado se tiene que el ion que absorbe un fotón de bombeo de 1480 nm transita directamente al nivel metaestable ($I_{13/2}$) y luego decae de nuevo al nivel basal ($I_{15/2}$) por emisión estimulada, si hay presencia de un fotón de señal dentro del rango de longitud de onda 1500 a 1600 nm.

Por otro lado, al bombear a 980 nm el ion transita primero al nivel excitado ($I_{11/2}$), pero luego decae rápidamente al nivel metaestable con un tiempo de decaimiento no radiativo de aproximadamente $1 \mu s$. El resto del proceso es similar al del bombeo de 1480 nm.

El tiempo de decaimiento relativamente largo (baja tasa de decaimiento de la emisión espontánea) en el nivel metaestable, permite que la inversión de la población se acumule cuando hay suficiente bombeo de fotones.

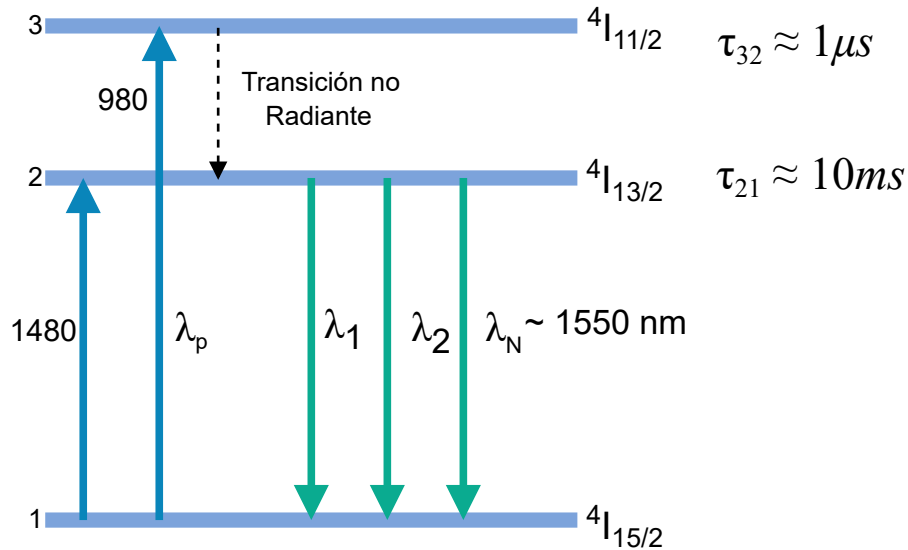


Figura 2.1: Diagrama simplificado de niveles energéticos de Er^{3+} en sílice

2.1.2 Sección transversal de espectros de emisión y absorción

Como se ha explicado hasta el momento, el Er^{3+} tiene múltiples niveles de energía y, por lo tanto, los iones pueden absorber fotones de varias longitudes de onda. Sin embargo, el espectro de absorción detallado también está influenciado por el material anfitrión, el sílice de vidrio.

A nivel microscópico, el intercambio de energía entre los niveles se rige por probabilidades o tasas de transición. Los procesos de absorción y emisión tienen tasas específicas que se cuantifican por sus secciones transversales de absorción (σ_a) y emisión (σ_e), respectivamente. Partiendo del diagrama de la Figura 2.1 se puede asumir un sistema de dos niveles, formados por los niveles 1 y 2, del que es posible obtener la potencia de luz incidente absorbida, la cual es proporcional a la sección transversal de absorción multiplicada por la intensidad incidente de luz (I_{in}), es decir:

$$P_{abs} = \sigma_a I_{in} \quad (2.1)$$

Análogamente, la potencia de luz emitida es proporcional a la sección transversal de emisión multiplicada por la intensidad de luz incidente; es decir:

$$P_{em} = \sigma_e I_{in} \quad (2.2)$$

A partir de estas ecuaciones, y considerando N_1 y N_2 como las poblaciones de iones de los niveles 1 y 2, respectivamente, se puede calcular la variación de potencia de la siguiente forma:

$$\Delta P = P_{em} - P_{abs} = (N_2 \sigma_e - N_1 \sigma_a) I_{in} \quad (2.3)$$

En la Figura 2.2 se muestra el espectro de emisión y absorción típico de Er^{3+} para el sílice de vidrio, en los rangos de 900 a 1000 nm y 1400 a 1600nm.

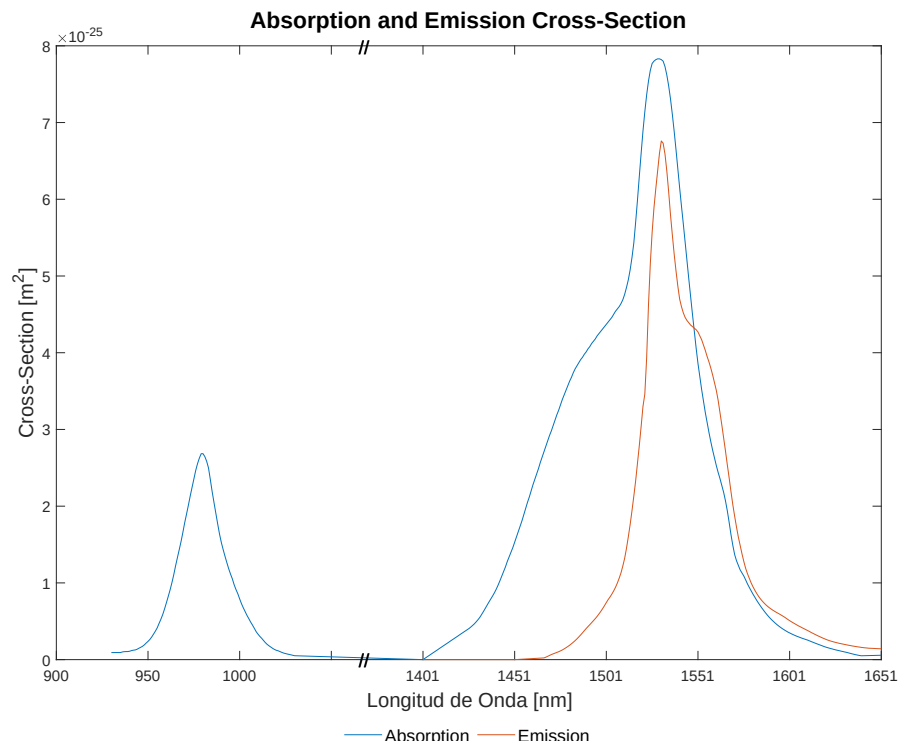


Figura 2.2: Espectro de emisión y absorción típico de fibra dopada con Erblio

2.2 Modelado matemático del EDFA

La primera consideración para el modelado matemático del EDFA, es la selección de la cantidad de niveles energéticos a considerar. En la sección anterior se detallaron 3 niveles energéticos, sin embargo, perfectamente podrían realizarse modelos más detallados incluyendo cuatro, cinco o más niveles energéticos, lo cual es común en amplificadores de fibra dopada con otras tierras raras, o incluso con una mezcla de elementos de tierras raras.

Considerando lo buscado en este trabajo y las frecuencias de operación utilizadas para el bombeo, los iones de Er^{3+} pueden ser tratados como un sistema de dos niveles, ya que el tercer nivel al que llegan al recibir excitación con 980 nm, como se explicó anteriormente, es de muy corta duración y decae sin emisión al segundo nivel, el nivel metaestable. A partir de aquí, el sistema puede ser tratado de igual forma que al recibir una excitación de 1480 nm. Por esta razón, el modelo del sistema será tratado únicamente con dos niveles.

2.2.1 Ecuaciones de transición y densidad poblacional de Iones

El modelo convencional del EDFA utilizado para modelar tanto la tasa de población de iones, la evolución de potencias de señal y bombeo a lo largo del amplificador, el factor de ruido (NF por sus siglas en inglés), para el sistema de dos niveles escogido se detalla en [14]. Las ecuaciones de la tasa de población de iones en ambos niveles son mostradas en las ecuaciones (2.4a) y (2.4b), para k canales ópticos.

$$\frac{dN_2}{dt} = \sum_k W_{a,k} N_1 - \sum_k W_{e,k} N_2 - N_2 \tau \quad (2.4a)$$

$$N_t = N_1 + N_2 \quad (2.4b)$$

Donde $W_{a,k}$ y $W_{e,k}$ representan las tasas de transición de absorción, es decir desde el nivel 1 al nivel 2, y de emisión, desde el nivel 2 al nivel 1, causado por el k -ésimo canal óptico, de bombeo, señal y ruido ASE. Las cuales se expresan en las ecuaciones (2.5a) y (2.5b).

$$W_{a,k} = \frac{\sigma_{a,k} I_k P_k}{h\nu_k} \quad (2.5a)$$

$$W_{e,k} = \frac{\sigma_{e,k} I_k P_k}{h\nu_k} \quad (2.5b)$$

Donde $i_k(r, \phi, z)$ es el perfil de intensidad óptica normalizada del k -ésimo canal, mostrada en la ecuación (2.6), donde $I_k(r, \phi, z)$ es el perfil de intensidad óptica del k -ésimo canal y $P_k(z)$ representa la potencia total en el punto z de la fibra.

$$i_k(r, \phi) = \frac{I_k(r, \phi, z)}{P_k(z)} \quad (2.6)$$

Finalmente, al considerarse en condiciones de estado estacionario, como dicta la ecuación (2.7), la ecuación (2.4a) se puede reescribir en la ecuación (2.8).

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 \quad (2.7)$$

$$N_2(r, \phi, z) = \frac{\sum_k W_{e,k}}{\sum_k W_{a,k} + \sum_k W_{e,k} + 1/\tau} N_t(r, \phi, z) \quad (2.8)$$

2.2.2 Ecuaciones de Propagación de Potencia

Las ecuaciones anteriormente descritas, describen el intercambio de energía entre el nivel metaestable y el nivel basal en términos de densidades de población de los iones de Erblio N_1 y N_2 . Ahora es necesario describir la evolución de las potencias ópticas de cada canal para el bombeo, la señal y el ruido ASE, también en términos de las densidades poblacionales de iones de Erblio, las que se describen en forma compacta y en coordenadas polares en la ecuación (2.9).

$$\begin{aligned} \frac{dP_k}{dz} = & u_k \sigma_{e,k} \cdot [P_k(z) + m h \nu_k \Delta \nu_k] \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^\infty i_k(r, \phi) N_2(r, \phi, z) r dr d\phi \\ & - u_k \sigma_{a,k} P_k(z) \int_0^{2\pi} \int_0^\infty i_k(r, \phi) N_1(r, \phi, z) r dr d\phi - \alpha_k P_k(z) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Donde u_k indica la dirección de propagación del canal, es decir $u_k = 1$ para un bombeo co-propagante y $u_k = -1$ para un bombeo contra-propagante; h es la constante de Planck; ν_k es la frecuencia del canal; $\Delta \nu_k$ el ancho de banda del canal. El término $m h \nu_k \Delta \nu_k$ representa la contribución de ruido ASE con $m = 2$ por las dos polarizaciones ortogonales soportadas por la fibra; α_k es el coeficiente de atenuación de la fibra.

2.2.3 Factor de superposición

El factor de superposición es un término importante a la hora de describir la amplificación, el cual estaba implícito en las ecuaciones anteriores, pero será de utilidad describirlo debidamente para luego dar el salto al modelo en fibras multimodo. Este factor de superposición espacial, mostrado en la ecuación (2.10), define el grado de interacción entre el k -ésimo canal y el perfil de dopaje de Erblio.

$$\Gamma_{k,i} = \int_0^a \int_0^{2\pi} i_k(r, \phi) n_i(r, \phi) r d\phi dr \quad i = 1, 2 \quad (2.10)$$

Donde n_i representa la densidad de población normalizada de iones en estado metaestable o basal, para $i = 1$ e $i = 2$, respectivamente, definida en la ecuación (2.11), con $\bar{N}$ la densidad poblacional promedio.

$$n_i(r, \phi, z) = N_i(r, \phi, z) / \bar{N} \quad i = 1, 2 \quad (2.11)$$

El factor $\Gamma_{k,i} \in [0,1]$ y es adimensional. Además como se explica en [14], generalmente se reduce a un único factor Γ_k , ya que las diferencias entre ambos es muy baja.

2.2.4 Modelado de EDFA multi-modo

El salto desde el modelado del amplificador EDFA monomodo, visto hasta el momento, hasta el EDFA multimodo requiere reescribir tanto las ecuaciones de propagación y evolución de las potencias como la evolución de las densidades de iones, por lo que ambos sistemas se plantean y comentan a continuación.

Evolución de las densidades poblacionales

Las ecuaciones (2.5) y (2.8) deben ser reescritas considerando que los modos de propagación se distribuyen radialmente en la fibra como muestra la ecuación 2.16. La ecuación (2.12) muestra el comportamiento para los modos de propagación (i, j, k) de señal, bombeo y ruido ASE en los canales $(\lambda_s \text{ y } \lambda_p)$, utilizando la notación descrita en la ecuación (2.13) con $T = i, j, k$

$$N_2 = \frac{\sum_T \frac{\sigma_a(\lambda_T) \Gamma_T P_T}{h\nu_T A_{eff,T}}}{\sum_T \frac{(\sigma_a(\lambda_T) + \sigma_e(\lambda_T)) \Gamma_T P_T}{h\nu_T A_{eff,T}}} \quad (2.12a)$$

$$N_2(z) = N_T(z) - N_1(z) \quad (2.12b)$$

$$\sum_T \frac{\sigma_a(\lambda_T) \Gamma_T P_T}{h\nu_T A_{eff,T}} = \sum_i \sum_{\lambda_s} \frac{\sigma_a(\lambda_s) \Gamma_{s,i} P_{s,i}}{h\nu_s A_{eff,i}} + \sum_j \sum_{\lambda_p} \frac{\sigma_a(\lambda_p) \Gamma_{p,j} P_{p,j}}{h\nu_p A_{eff,j}} + \sum_k \sum_{\lambda_s} \frac{\sigma_a(\lambda_s) \Gamma_{s,k} P_{ASE,k}}{h\nu_s A_{eff,k}} \quad (2.13)$$

Propagación de Potencias

El modelado matemático de la evolución de la potencia a lo largo del amplificador se detalla en la referencia [12] y se presentan en las ecuaciones (2.14). Estas ecuaciones están basadas en las presentadas hasta el momento.

$$\frac{dP_{s,i}}{dz} = P_{s,i} \int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_i [N_2(r, \phi, z) \sigma_e(\lambda_s) - N_1(r, \phi, z) \sigma_a(\lambda_s)] r dr d\phi \quad (2.14a)$$

$$\frac{dP_{p,j}^\pm}{dz} = -P_{p,j}^\pm \int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_j N_1(r, \phi, z) \sigma_a(\lambda_p) r dr d\phi \quad (2.14b)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{ASE,i}}{dz} = & P_{ASE,i} \int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_{s,i} [N_2(r, \phi, z) \sigma_e(\lambda_s) - N_1(r, \phi, z) \sigma_a(\lambda_s)] r dr d\phi \\ & + mh\lambda(s) \Delta\lambda \sigma_e(\lambda_s) \int_0^{2\pi} \int_0^a N_2(r, \phi, z) \Gamma_{s,i} r dr d\phi \end{aligned} \quad (2.14c)$$

Donde $P_{s,i}$, $P_{p,j}$ y $P_{ASE,i}$ representan la potencia de señal, bombeo y ruido ASE en los modos (i, j, k) respectivamente; λ_s y λ_p son los canales de señal y bombeo respectivamente.

Factor de Superposición en fibra multi-modo

En una fibra multi-modo, no puede suponerse una excitación uniforme de la población de iones en cada punto de la sección transversal de la fibra, ya que cada modo guiado utilizado para el bombeo tiene una distribución espacial única. Esto se expresa mediante $i_{k,lm}$ y representa el perfil de intensidad normalizado del modo LP_{lm} en el canal k , definido en la ecuación (2.15), siguiendo la notación utilizada en la referencia [15].

$$i_{k,lm}(r, \phi) = \frac{\psi_{k,lm}(r, \phi)}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \psi_{k,lm}(r, \phi) r dr d\phi} \quad (2.15)$$

Donde $\psi_{k,lm}(r, \phi)$ denota el perfil de intensidad del modo LP_{lm} en el canal k . A fines prácticos, el perfil de intensidades se modela según la ecuación (2.16), donde a representa el radio del núcleo de la fibra, y los términos W y U son las constantes de propagación.

$$\psi_{lm}(r, \phi) = \begin{cases} \frac{J_l(U \frac{r}{a})}{J_l(U)} \cdot f(\phi) & , \quad r \leq a \\ \frac{K_l(W \frac{r}{a})}{K_l(W)} \cdot f(\phi) & , \quad r > a \end{cases} \quad (2.16)$$

Donde

$$f(\phi) = \begin{cases} \cos(l \cdot \phi) & , \quad \text{Polarización } a \\ \sin(l \cdot \phi) & , \quad \text{Polarización } b \end{cases} \quad (2.17)$$

Acoplamiento Intermodal

Este modelo incluye el ruido ASE y su efecto sobre la potencia de señal; sin embargo, no incluye el efecto del acoplamiento intermodal, lo cual debe reducir la ganancia causando una degradación de la relación señal a ruido. Este efecto puede incluirse en el modelo matemático, tal como indica el documento [16], agregando el componente de acoplamiento a las ecuaciones de evolución de señal y potencia, (2.14a) y (2.14b). El nuevo sistema se muestra en las ecuaciones (2.18).

$$\frac{dP_{s,i}}{dz} = P_{s,i} \int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_i [N_2(r, \phi, z) \sigma_e(\lambda_s) - N_1(r, \phi, z) \sigma_a(\lambda_s)] r dr d\phi - \sum_{k=1}^{M_s} d_{s,i \leftrightarrow k} [P_{s,i} - P_{s,k}] \quad (2.18a)$$

$$\frac{dP_{p,j}^{\pm}}{dz} = -P_{p,j}^{\pm} \int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_j N_1(r, \phi, z) \sigma_a(\lambda_p) r dr d\phi - \sum_{k=1}^{M_p} d_{p,j \leftrightarrow k} [P_{p,j} - P_{p,k}] \quad (2.18b)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{ASE,i}}{dz} = & P_{ASE,i} \int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_{s,i} [N_2(r, \phi, z) \sigma_e(\lambda_s) - N_1(r, \phi, z) \sigma_a(\lambda_s)] r dr d\phi \\ & + mh\lambda_s \Delta\lambda \sigma_e(\lambda_s) \int_0^{2\pi} \int_0^a N_2(r, \phi, z) \Gamma_{s,i} r dr d\phi \end{aligned} \quad (2.18c)$$

El término $d_{s,i \leftrightarrow k}$ y $d_{p,j \leftrightarrow k}$ representa el acoplamiento entre modos de señal y potencia, respectivamente y se describe en la ecuación 2.19. Este coeficiente, como se explica en la documentación de VPIphotonics Software [17], usado para validar los resultados, depende fuertemente de la diferencia entre las constantes de propagación de los modos implicados, $\Delta\beta_{i,j}(z) = \beta_i(z) - \beta_j(z)$, y de las imperfecciones de la fibra [18]

Las imperfecciones en la fibra son modeladas como una función que puede ser parametrizada como una función determinística y una función aleatoria dependiendo de la posición z en la fibra. Esta función aleatoria se considera independiente del modo de propagación, estacionaria y de promedio cero.

$$d_{i \leftrightarrow j} = \frac{(K^{ij})^2}{2} \text{ACF}(d_{cor}, \Delta\beta_{ij}(z)) \quad (2.19)$$

Donde ACF representa la transformada de Fourier de la función de autocorrelación (ACF) de la parte aleatoria de la función de imperfecciones en la fibra; K^{ij} es el coeficiente de acoplamiento, de valor establecido en 0.01 [1/m], según los datos del Software; por último d_{cor} corresponde a la longitud de correlación de acoplamiento, de valor por defecto 0.05 [m].

La función de autocorrelación (ACF) se modela con una forma exponencial, según la ecuación 2.20

$$ACF(z) = \exp\left(\frac{|z|}{d_{cor}}\right) \quad (2.20)$$

Con lo que $d_{i \leftrightarrow j}$ se reduce a una ecuación que depende únicamente de constantes y $\Delta\beta_{ij}(z)$, como indica la ecuación (2.21)

$$d_{i \leftrightarrow j}(z) = (K^{ij})^2 \frac{d_{cor}}{1 + (d_{cor} \cdot \Delta\beta_{ij}(z))^2} \quad (2.21)$$

2.3 Teoría del Amplificador Raman Distribuido

La amplificación Raman ha demostrado ser una de las tecnologías habilitadora para la implementación de sistemas de comunicación óptica de alta capacidad. Esto se debe principalmente a que la ganancia Raman se puede proporcionar a lo largo de toda la fibra de transmisión, lo que garantiza que la relación señal-ruido mejore en comparación con la amplificación discreta. Además, la amplificación Raman también ofrece la posibilidad de proporcionar ganancia en cualquier longitud de onda simplemente haciendo coincidir las longitudes de onda de la señal y la bomba con el desplazamiento de Stokes. Esto permite, por ejemplo, amplificar regiones del espectro electromagnético fuera de la banda C utilizada actualmente.

El efecto de amplificación Raman ocurre gracias al esparcimiento Raman estimulado, fenómeno intrínseco del sílice de vidrio, por lo que puede ocurrir en cualquier fibra óptica de este material. Este efecto ocurre cuando el haz de señal se propaga simultáneamente con otro haz, denominado haz de bombeo, cuya longitud de onda coincide con el desplazamiento Stokes lo que provoca una resonancia en el haz de señal.

El desplazamiento Stokes es característico del material por el cual se propagan los haces y en el sílice de vidrio presenta su peak a los 13 [THz]. Esta frecuencia de desplazamiento, que cuando se trabaja con un haz de señal de 1550 nm, corresponde a 100 nm de desplazamiento en longitud de onda para el haz de bombeo; es decir, cuando este tiene una longitud de onda de 1450 nm. Además, el ancho de banda de un amplificador Raman se puede ampliar combinando varias longitudes de onda de bombeo. [19].

2.3.1 Esparcimiento Raman

Un fotón que viaja por la fibra puede interactuar con las moléculas de esta, siendo absorbido y emitido por los electrones del material. Esta absorción y emisión se ajusta a los niveles de energía definidos por los electrones, pasando por un nivel de energía intermedio virtual.

Esta interacción puede producir dos tipos de fenómenos: una dispersión elástica o una dispersión inelástica. Cuando se produce una dispersión elástica el fotón mantiene su frecuencia luego de finalizar el proceso, como ocurre en la dispersión Rayleigh [20], esto se observa en la Figura 2.3a para un fotón incidente de frecuencia ν_0 . Contrariamente, al ocurrir una dispersión inelástica, se altera la frecuencia del fotón, alterándose así también su energía. Dos tipos de dispersiones analíticas son el esparcimiento Raman y el esparcimiento Brillouin; este trabajo se centra en el primero de estos.

El esparcimiento Raman es una dispersión inelástica de la luz producida de naturaleza muy rápida (≈ 10 fs) y consiste en la destrucción de un fotón incidente (onda de bombeo) para entregar

energía al medio (esparcimiento Stökes) o para absorber energía de este (esparcimiento Anti-Stökes) y, desde el punto de vista de generación de ondas Stökes y Anti-Stökes, puede producirse de manera espontánea o estimulada. [21]

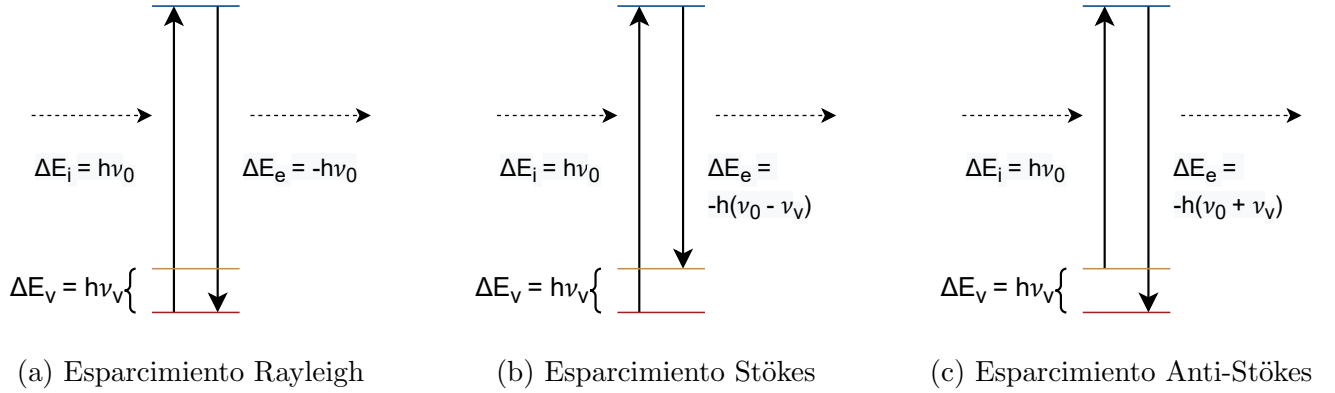


Figura 2.3: Diagramas energéticos de esparcimientos Rayleigh, Stökes y Anti-Stökes.

Esparcimiento Raman Espontáneo

Si el esparcimiento Raman ocurre de forma natural; es decir, sin la presencia de agentes externos que propicien su aparición, se dice que ha ocurrido espontáneamente y se denomina Esparcimiento Raman Espontáneo. Cuando un fotón de frecuencia ν_0 es absorbido por una molécula de estado energético arbitrario, este aumenta su energía llegando a un estado energético denominado *nivel virtual*. Cuando la molécula se encuentra en este nivel energético, intentará volver a su estado original, liberando un fotón mediante decaimiento energético espontáneo, a partir de aquí pueden suceder dos situaciones diferentes, cada una de grado probabilístico distinto. Estos fenómenos se observan en la Figura 2.3b y 2.3c, donde el fotón incidente tiene frecuencia ν_0 .

Luego de la emisión espontánea, si el nivel energético final de la molécula es mayor que el inicial, el fotón emitido tendrá una frecuencia menor al incidente $\nu_0 - \nu_v$ y el remanente energético es absorbido por el material; a este fenómeno se le conoce como Esparcimiento Raman Espontáneo Stökes y se muestra en la Figura 2.3b. Por otro lado, si la molécula inicialmente se encuentra en un estado vibracional excitado y el fotón emitido posee una frecuencia mayor al fotón incidente $\nu_0 + \nu_v$, el fenómeno se denomina Esparcimiento Raman Espontáneo Anti-Stökes, como se muestra en la Figura 2.3c. Cabe destacar que los fotones emitidos por los fenómenos de Esparcimiento Raman Espontáneo Stökes y Anti-Stökes poseen fase y polarización aleatoria, por tanto son considerados como ruido ASE (Amplified Spontaneous Emission).

Esparcimiento Raman Estimulado (SRS)

Este fenómeno ocurre cuando las moléculas del medio interactúan con dos fotones, de frecuencias $\nu_p > \nu_s$ y (denominadas de *bombeo* y *señal* respectivamente). La señal de *bombeo* estimula las moléculas, aumentando su nivel energético a un estado virtual, de manera muy similar al Esparcimiento Raman Espontáneo. Por otro lado, el fotón de señal provoca un fenómeno conocido como Emisión Estimulada, de manera que la molécula baja su nivel energético produciendo un fotón de energía $h\nu_s$ en el proceso, a esto se le denomina Esparcimiento Raman Estimulado Stökes. Este nuevo fotón generado es coherente con el fotón de *señal* incidente, es decir, posee la misma fase, polarización y dirección que el fotón de *señal* y se denomina onda Stökes. Generándose, en consecuencia, amplificación óptica de la señal de frecuencia ν_s . Mientras que, la energía remanente $h(\nu_p - \nu_s)$ es absorbida por la fibra en forma de fonón óptico.

También es posible que la energía de un fonón se sume con la de un fotón de *bombeo*, generando también en el decaimiento estimulado un fotón de frecuencia ν_{as} . Este proceso se denomina Esparcimiento Raman Estimulado Anti-Stökes y, debido a las características físicas de la fibra, es despreciable frente al proceso Stökes estimulado [22]. Ambos procesos se ilustran en la Figura 2.4

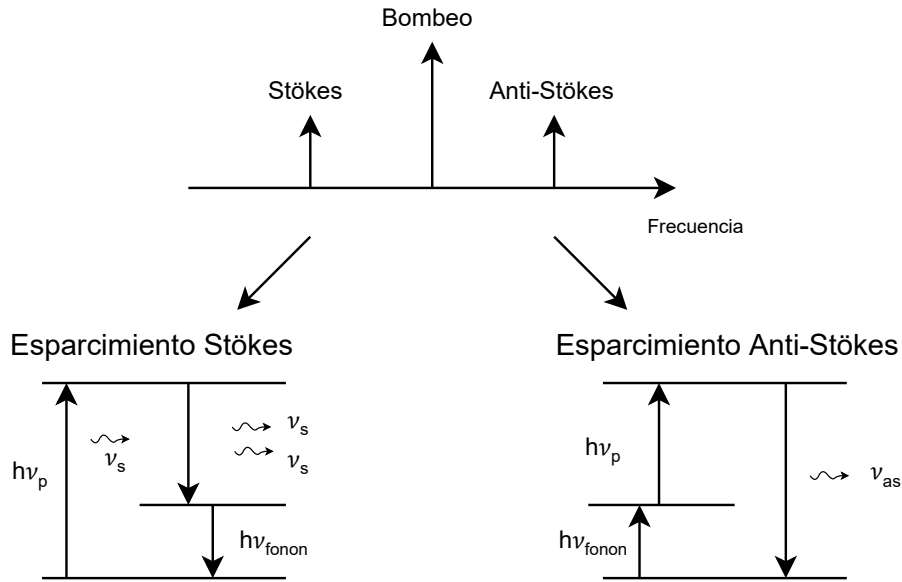


Figura 2.4: Diagrama de Esparcimiento Raman estimulado.

Gracias a este proceso inelástico, es posible convertir cualquier fibra óptica en un amplificador óptico con un amplio ancho de banda, ya que la amplificación, como fue explicado anteriormente, se produce por un traspaso energético de una onda de mayor frecuencia a otra de menor frecuencia. Además, cabe destacar que la onda Stökes puede tanto co-propagarse como contra-propagarse, por lo que la amplificación Raman puede ser bidireccional.

Ganancia Raman

Como se explicó en las secciones anteriores, la amplificación Raman se basa en el Esparcimiento Raman Estimulado, a partir de la onda Stökes. Debido a la naturaleza amorfa del material que compone la fibra óptica, la emisión de la onda Stökes no es monocromática, por lo que posee un espectro continuo con un cierto ancho de banda. Por esta razón, la forma del espectro de ganancia dependerá del tipo de fibra utilizado. La Figura 2.5 muestra el espectro de ganancia Raman de la fibra monomodo modelo SMF-28 entregado por el software OptiSystem y por el software VPI Photonics.

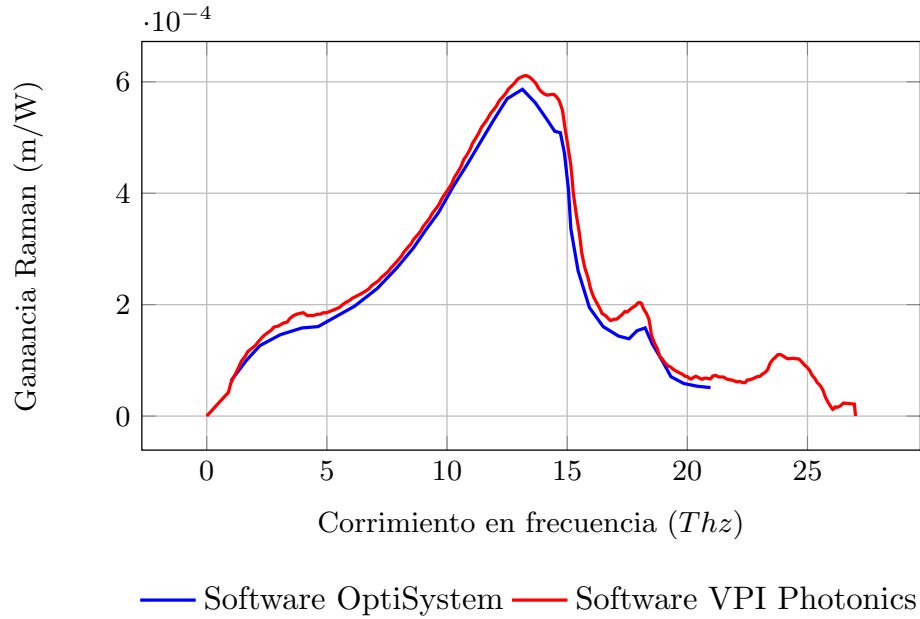


Figura 2.5: Ganancia Raman para fibra monomodo.

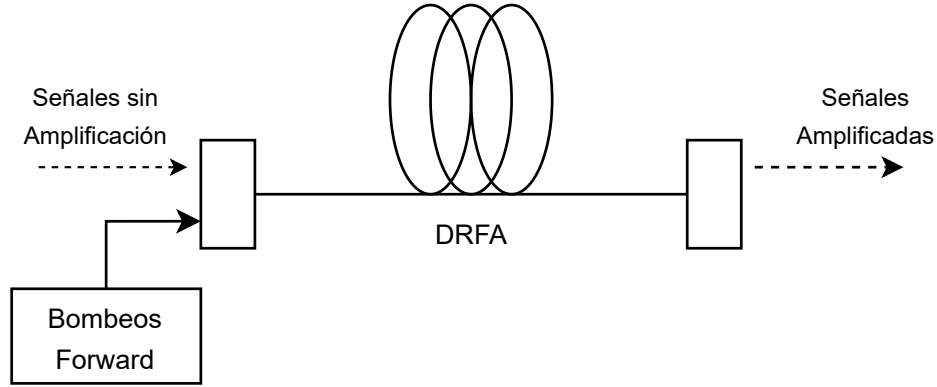
El espectro de ganancia Raman posee un ancho de banda de varias decenas de THz, con un valor máximo a los 13,2 THz de corrimiento en frecuencia entre las ondas de señal y bombeo involucradas, que corresponde a 100 nm aproximadamente en la banda de los 1500 nm [23].

Otra característica principal respecto a la ganancia Raman es que, como se puede deducir de sus unidades, tiene un carácter distribuido ya que se adquiere a medida que la señal se propaga a lo largo de la fibra. Por esta razón, a diferencia de los amplificadores EDFA que suelen ser de unos pocos metros de largo, los amplificadores Raman requieren decenas de kilómetros para lograr la amplificación deseada.

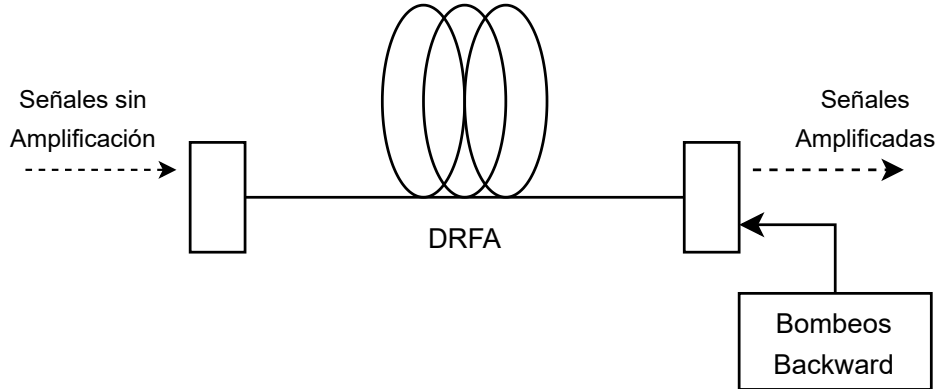
La ganancia Raman, debido a las características no resonantes del Esparcimiento Raman Estimulado, es un proceso muy rápido, del orden de los 10 fs de duración. Además, esta ganancia es dependiente de la polarización. Lo que genera que las ganancias co-polarizadas o paralelas sean

cercanas a un orden de magnitud mayor a las ganancias de polarización perpendicular u ortogonal.

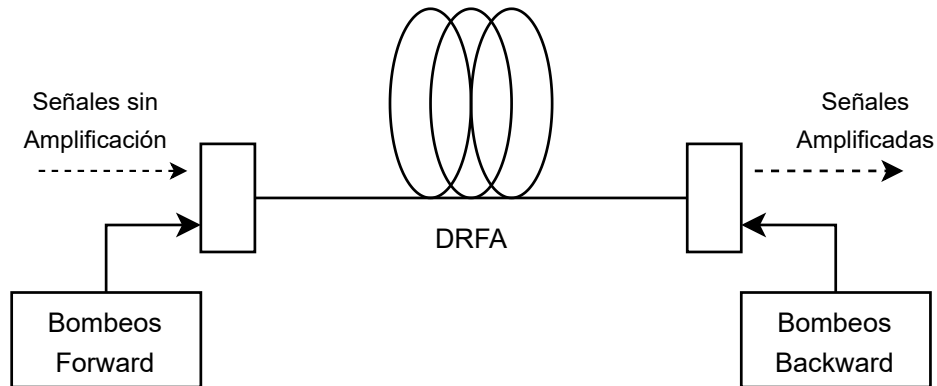
Finalmente, debido a que la onda Stökes puede tanto co-propagarse como contra-propagarse con la señal de bombeo, la ganancia Raman no depende de la dirección relativa de propagación de la fuente de bombeo y de la señal a amplificar. Esto permite tres tipos de configuraciones para el bombeo.



(a) Configuración de bombeo Forward o Directo.



(b) Configuración de bombeo Backward o Reverso.



(c) Configuración de bombeo Bidireccional.

Figura 2.6: Distintas configuraciones de bombeo para DRFA.

Bombeos en amplificación Raman

Como se ha señalado en las secciones anteriores, como muestra la Figura 2.6, es posible construir los DFRA en tres configuraciones según la dirección de la onda Stökes:

- a) Configuración *Forward* o Directa: Las señales de bombeo son inyectadas al inicio de la fibra, junto con los canales de señal y se propagan en la misma dirección. Esta configuración es mostrada en la Figura 2.6a.
- b) Configuración *Backward* o Reversa: En esta configuración las señales de bombeo son inyectadas desde el extremo final de la fibra, por lo que, mientras los canales de señal se propagan en sentido Forward, los haces de bombeo se propagan hacia “atrás” en la fibra, en sentidos opuestos. Esta configuración se muestra en la Figura 2.6b.
- c) Configuración *Bidireccional*: Este caso es una combinación de los dos anteriores, es decir algunos haces de bombeo se propagan en sentido Forward co-propagándose respecto a la señal, mientras que otros son inyectados desde el final del amplificador por lo que se propagan en sentido opuesto a la señal, contra-propagándose. Esta configuración se muestra en la Figura 2.6c.

Cada una de estas configuraciones de bombeo genera resultados diferentes, en cuanto a ganancia y ruido generado, por lo que se debe escoger adecuadamente según el tipo de enlace. La configuración directa proporciona una menor ganancia manteniendo una alta relación señal a ruido. Por el contrario, la configuración reversa genera una mayor ganancia, al tener una mayor eficiencia de conversión de potencia, a costo una mayor degradación señal a ruido. Por último, la configuración bidireccional se mantiene en un intermedio de ambos casos [24].

2.4 Modelado Matemático del DFRA

Como se detalló en la sección anterior, el SRS ocurre en todo tipo de fibras, sin embargo, cuando se opera con bajos niveles de potencia, puede ser despreciado. Esto ocurre por ejemplo en los EDFAs analizados anteriormente. Esto lleva a una necesidad de definir un umbral de potencia para el cual debe tomarse en cuenta esta transferencia energética entre los haces de bombeo y señal.

El umbral de potencia P_{thres} , puede ser estimado despreciando el agotamiento del bombeo en función de α , el coeficiente de atenuación de la fibra en la frecuencia del haz de bombeo, el área efectiva de la fibra, A_{eff} , el coeficiente de ganancia Raman g_R y el largo efectivo de la fibra L_{eff} , según la ecuación (2.22) al utilizar un bombeo co-propagante respecto a la señal [9].

$$P_{thres} \approx 32 \cdot \frac{A_{eff}}{L_{eff}g_R} \quad (2.22)$$

Mientras que si el bombeo es contra-propagante, el umbral es ligeramente mayor y puede estimarse por la ecuación (2.23).

$$P_{thres} \approx 40 \cdot \frac{A_{eff}}{L_{eff}g_R} \quad (2.23)$$

A su vez, el largo efectivo se define como el largo para el cual la interacción entre los haces de señal y bombeo es relevante. Se utiliza este largo ya que así es posible considerar el hecho de que el bombeo se va atenuando y queda definido en la ecuación (2.24)

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (2.24)$$

Las dos estimaciones presentadas consideran sólo una fuente de bombeo y un canal de señal; sin embargo el umbral de potencia decrece con el número de canales utilizados. Es por esto que en los actuales sistemas DWDM (Dense Wave Division Multiplexing) el umbral es ampliamente superado al utilizar los altos niveles de potencias que suelen emplearse en los amplificadores Raman Distribuidos.

2.4.1 Ecuaciones de Propagación

Partiendo de un modelo monomodo, tal como se hizo en la sección del EDFA, se plantea un sistema de ecuaciones que modela, inicialmente de forma sencilla, la interacción de las señales involucradas en el SRS, la fuente de bombeo y el canal de señal. Considerando un amplificador con potencia de bombeo P_p , con cualquiera de las configuraciones descritas anteriormente, y un canal de señal P_s

propagandose en dirección +z, un sistema de ecuaciones simple que describe la interacción entre ambas se muestra en las ecuaciones (2.25a) y (2.25b) [9].

$$\frac{dP_v^s}{dz} = -\alpha_s P^s + g_R(P^{p+} + P^{p-})P^s \quad (2.25a)$$

$$\pm \frac{dP^{p\pm}}{dz} = -\alpha_p P^{p\pm} - \frac{\lambda_s}{\lambda_p} g_R P^s P^{p\pm} \quad (2.25b)$$

Donde α_s y α_p son los coeficientes de atenuación de la fibra en las longitudes de onda de señal y bombeo λ_s y λ_p respectivamente. El término $g_R P_p^+ P_p^-$ describe el acoplamiento SRS entre ambos haces de luz y la ganancia Raman, g_R que depende del desplazamiento entre ambas longitudes de onda $g_R(\lambda_s, \lambda_p)$, determina la fuerza de este acoplamiento. El término final de la ecuación de potencia (2.25b) se denomina agotamiento del bombeo y dicta la forma en que el haz de bombeo entrega energía al haz de señal.

2.4.2 Ganancia on-off

Si bien es posible determinar la ganancia neta de la amplificación Raman, a menudo es utilizada la ganancia *on-off*, la cual se define como el aumento en la potencia de la señal amplificada a la salida del amplificador estando los haces de bombeo activos respecto a la misma señal sin los haces de bombeo activos. Esta magnitud se muestra en la ecuación (2.26) para un amplificador DFRA de largo L.

$$G_{on-off} = \frac{P_s(L)_{on}}{P_s(L)_{off}} \quad (2.26)$$

Donde $P_s(L)_{on}$ y $P_s(L)_{off}$ son la potencia del haz de señal a la salida del amplificador, en la posición L, con y sin los haces de bombeos activos respectivamente.

2.4.3 Ruido ASE

El modelo presentado anteriormente, si bien establece la interacción SRS entre las señales involucradas, no está tomando en cuenta el factor del ruido generado. En las actuales transmisiones basadas en DWDM y en los futuros sistemas SDM, el ruido de emisión espontánea amplificado (ASE) juega un papel importante en la degradación de la señal de salida.

Para el caso de los amplificadores Raman, el ruido ASE puede cuantificarse mediante el factor de esparcimiento espontáneo n_{sp} , definido en la ecuación (2.27) y por el ancho de banda del ruido.

$$n_{sp}(u, v) = 1 + \left(\exp \left(\frac{-h(v - u)}{k_B T} \right) - 1 \right)^{-1} \quad (2.27)$$

Donde k_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta de la fibra, h la constante de Planck, v y u representan las frecuencias del haz de bombeo y señal, respectivamente [25].

Al reescribir el sistema de ecuaciones (2.25) añadiendo el término de ASE, se obtiene el sistema de ecuaciones (2.28) [26]

$$\frac{dP^s}{dz} = -\alpha_s P^s + g_R(P^{p+} + P^{p-})P^s + hu\Delta u(P^{p+} + P^{p-})g_R n_{sp}(u, v) \quad (2.28a)$$

$$\pm \frac{dP^{p\pm}}{dz} = -\alpha_p P^{p\pm} - \frac{\lambda_s}{\lambda_p} g_R P^s P^{p\pm} - 2 \frac{\lambda_s}{\lambda_p} hv \Delta v P^{p\pm} g_R n_{sp}(u, v) \quad (2.28b)$$

Donde $u, \Delta u$ y $v, \Delta v$ son las frecuencias y anchos de banda efectivos de los haces de señal y bombeo, respectivamente. Finalmente, este sistema de ecuaciones puede ser adaptado para modelar un sistema con múltiples canales de señal y bombeo, como los actuales sistemas WDM y DWDM; esto se muestra en las ecuaciones (2.29) con u canales de señal y v canales de bombeo.

$$\frac{dP_u^s}{dz} = -\alpha_s P_u^s + g_R \left(\sum_v (P_v^{p+} + P_v^{p-}) \right) P_u^s + hu\Delta u \sum_v (P_v^{p+} + P_v^{p-})g_R n_{sp}(u, v) \quad (2.29a)$$

$$\pm \frac{dP_v^{p\pm}}{dz} = -\alpha_p P_v^{p\pm} - g_R \sum_u \frac{\lambda_s}{\lambda_p} P_u^s P_v^{p\pm} - 2hv\Delta v \sum_u \frac{\lambda_s}{\lambda_p} n_{sp}(u, v) P_v^{p\pm} g_R n_{sp} \quad (2.29b)$$

2.4.4 Modelado de DFRA en sistema multi-modo

Las ecuaciones planteadas anteriormente, son válidas tanto en sistemas de un solo haz de señal y bombeo como también para múltiples haces, como ocurre en los sistemas WDM y DWDM, sin embargo, consideran que toda la propagación ocurre únicamente en el modo fundamental, es decir en sistemas monomodo.

Al propagar múltiples modos por la fibra, la ganancia obtenida ya no dependerá únicamente de la ganancia Raman, descrita anteriormente, si no que también la superposición de los modos involucrados. Esta superposición puede cuantificarse mediante la integral de superposición de modos. Tomando dos modos m y n , se expresa la integral de superposición $f_{m,n}$ mediante la ecuación (2.30). [27]

$$f_{m,n} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} I_m(x, y) I_n(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} I_m(x, y) dx dy \int_{-\infty}^{+\infty} I_n(x, y) dx dy} \quad (2.30)$$

Donde $I_m(x, y)$ representa la intensidad del modo m definido en la ecuación (2.16). Este término suele utilizarse normalizado respecto a la superposición entre modos fundamentales para así tomar valores entre 0 y 1 [16].

Ahora es posible reescribir los sistemas de ecuaciones anteriormente descritos tomando en cuenta esta superposición; esto se aprecia en las ecuaciones (2.31) [27].

$$\begin{aligned} \frac{dP_{m,u}^s}{dz} = & -\alpha_s P_{m,u}^s + g_R \left(\sum_n \sum_v f_{m,n} (P_{n,v}^{p+} + P_{n,v}^{p-}) \right) P_{m,u}^s \\ & + hu\Delta u \sum_n \sum_v f_{m,n} (P_{n,v}^{p+} + P_{n,v}^{p-}) g_R n_{sp}(u, v) \end{aligned} \quad (2.31a)$$

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_{n,v}^{p\pm}}{dz} = & -\alpha_p P_{n,v}^{p\pm} - \sum_m \sum_u \frac{\lambda_s}{\lambda_p} g_R f_{m,n} P_{m,u}^s P_{n,v}^{p\pm} \\ & - 2hv\Delta v \sum_m \sum_u \frac{\lambda_s}{\lambda_p} f_{m,n} n_{sp}(u, v) P_{n,v}^{p\pm} g_R n_{sp} \end{aligned} \quad (2.31b)$$

Donde m, n representan los modos espaciales de los haces de señal y bombeo respectivamente, mientras que, respetando la notación anteriormente utilizada, u, v representan la frecuencia de cada canal de los haces de señal y bombeo respectivamente.

Esparcimiento Rayleigh

Un efecto no tomado en cuenta hasta el momento, es el esparramiento Rayleigh, que, como se muestra en la Figura 2.3a, es un fenómeno que afecta a haces con igual longitud de onda. Este fenómeno ocurre cuando hay bombeo bidireccional con haces que tienen igual frecuencia. Este

esparcimiento genera una onda que se contra-propaga respecto a la onda original generando una pequeña amplificación [28] [29].

Esta ganancia se cuantifica mediante el coeficiente Rayleigh Backscattering η que depende de la longitud de onda. Su dependencia con la longitud de onda se muestra en la Figura 2.7. Este gráfico se obtuvo con los datos obtenidos del Software OptiSystem.

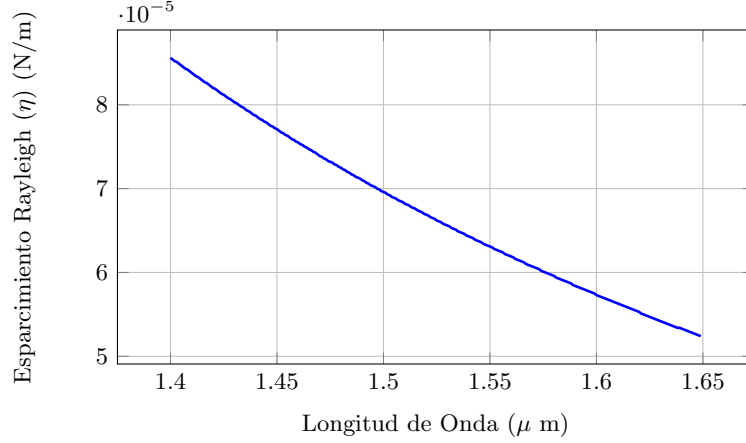


Figura 2.7: Coeficiente Rayleigh backscattering η vs longitud de onda.

Finalmente, agregando este efecto al sistema de propagación y amplificación de potencias se obtienen las ecuaciones (2.32)

$$\begin{aligned} \frac{dP_{m,u}^s}{dz} = & -\alpha_s P_{m,u}^s + g_R \left(\sum_n \sum_v f_{m,n} (P_{n,v}^{p+} + P_{n,v}^{p-}) \right) P_{m,u}^s \\ & + hu\Delta u \sum_n \sum_v f_{m,n} (P_{n,v}^{p+} + P_{n,v}^{p-}) g_R n_{sp}(u, v) \end{aligned} \quad (2.32a)$$

$$\begin{aligned} \pm \frac{dP_{n,v}^{p\pm}}{dz} = & -\alpha_p P_{n,v}^{p\pm} - \sum_m \sum_u \frac{\lambda_s}{\lambda_p} g_R f_{m,n} P_{m,u}^s P_{n,v}^{p\pm} + \sum_m \sum_u f_{m,n} P_{n,v}^{p\mp} \eta(v) \\ & - 2hv\Delta v \sum_m \sum_u \frac{\lambda_s}{\lambda_p} f_{m,n} n_{sp}(u, v) P_{n,v}^{p\pm} g_R n_{sp} \end{aligned} \quad (2.32b)$$

2.5 Conclusión

Este capítulo ha presentado un análisis detallado de la teoría y los modelos matemáticos de los amplificadores EDFA y Raman Distribuido en fibras monomodo y multimodo. Se revisó la teoría

básica de los iones de Erblio trivalente en el sílice y sus propiedades radiativas en el caso del EDFA, y se describió el fenómeno del esparcimiento Raman en el caso del amplificador Raman Distribuido. Además, se presentaron modelos matemáticos completos para describir la amplificación de la señal, la absorción del bombeo, la generación de emisión espontánea amplificada y el efecto del ruido ASE en ambos tipos de amplificadores. Los modelos también incluyeron el efecto del esparcimiento Rayleigh en el caso del amplificador Raman Distribuido.

Se presentaron también modelos matemáticos para describir la evolución de potencias en un DFRA, y se agregó el efecto del ruido ASE y del esparcimiento Rayleigh, para finalmente presentar el modelo multi-modo con todos estos fenómenos. En el caso de los amplificadores EDFA se describió cómo se modifica este modelo para adaptarse al caso de amplificación basada en fibras multimodo.

Los modelos propuestos en este capítulo proporcionan una base sólida para el diseño y análisis de sistemas de comunicaciones ópticas basados en amplificadores EDFA y Raman Distribuido. Los modelos matemáticos y las ecuaciones propuestas en este capítulo son herramientas valiosas para la comprensión de los mecanismos de amplificación en estos tipos de amplificadores, y proporcionan una base para el diseño y optimización de sistemas de comunicaciones ópticas.

Capítulo 3

Caracterización y validación de modelos matemáticos de amplificadores ópticos EDFA y DFRA mediante simulación numérica

En este capítulo se presentan los métodos de validación realizados para ambos amplificadores ópticos, mostrando los resultados obtenidos en cuanto a la evolución de las potencias de las señales presentes, la ganancia final para el EDFA y la ganancia on-off para el amplificador Raman. Se incluyen además resultados sobre la generación y amplificación de ruido ASE y la figura de ruido de los amplificadores.

3.1 Validación del EDFA

En primer lugar se evalúan los resultados obtenidos por el amplificador de fibra dopada con iones de Erblio. La validación se realiza en forma de comparación, mostrando los resultados obtenidos mediante el simulador realizado en este trabajo, junto a los resultados entregados, utilizando los mismos parámetros de fibra y señales, por el software comercial VPIphotonics.

3.1.1 Bombeo en modo LP01

En un primer caso de comparación de resultados, se configuraron los mismos parámetros de fibra y características de los haces de señal y bombeo de entrada, tanto en el simulador de Matlab como en el software VPIphotonics. Los parámetros asociados a la fibra y ruido ASE se muestran en la

Tabla 3.1 y los parámetros asociados a los haces de señal y bombeo en la Tabla 3.2.

<i>Parámetros de entrada al simulador</i>	<i>Valores utilizados</i>
Parámetros del EDFA	
Largo de fibra	3 [m]
Radio de fibra	5 μm
Densidad de iones de Erbio	7×10^{24} [iones/m ³]
Índice refracción del núcleo (n_1)	1.45
Índice de refracción del revestimiento (n_2)	1.4354
Apertura numérica	0.2051
Potencia de ruido ASE a la entrada	-200 dBm

Tabla 3.1: Parámetros de fibra en EDFA

<i>Parámetros de entrada al simulador</i>	<i>Valores utilizados</i>	
	Haces de señal	Haces de Bombeo
Número de canales	20	1
Longitudes de onda	[1523.55 , 1569] nm	980 nm
Modos espaciales	LP01 , LP11a	LP01
Potencia de entrada	-10 dBm	250 mW
Separación entre canales	300 GHz	-

Tabla 3.2: Parámetros de las señales de entrada

Para este primer caso, como se detalla en la Tabla 3.2, se utiliza un único canal de bombeo de 980 nm en el modo LP01. La distribución de potencia de la señal de bombeo a lo largo del amplificador obtenida mediante Matlab y VPIphotonics se muestra en la Figura 3.1. Esta Figura muestra el comportamiento del haz de bombeo dentro del amplificador, el que tiene un comportamiento decreciente, tal como es esperado ya que este haz entrega parte de su energía a los iones presentes en la fibra para lograr la inversión poblacional. Además muestra una correspondencia casi perfecta entre ambas señales, con una diferencia media de 0.016 dB.

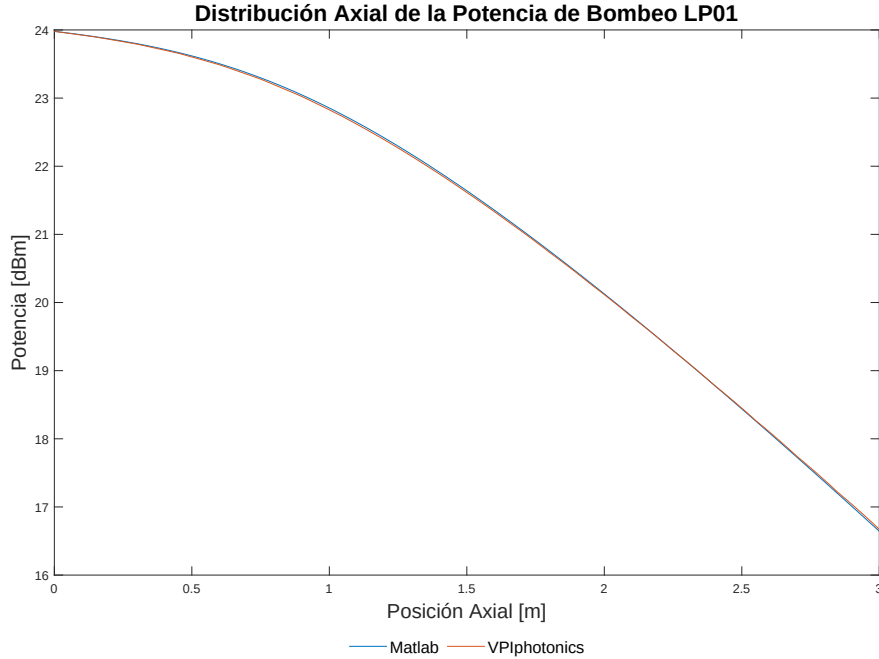


Figura 3.1: Distribución longitudinal de la potencia de bombeo.

Este bombeo genera la distribución de densidades poblacionales de iones a lo largo del EDFA como se muestra en la Figura 3.2. No fue posible obtener los datos de la simulación en VPIphotonics, por lo que se muestra únicamente el resultado de la simulación en Matlab. Este resultado muestra un porcentaje de población de iones cercano al 90%, que si bien no es una inversión completa al inicio de la fibra, es un porcentaje suficientemente alto para un buen nivel de amplificación. En la práctica, es posible que diversos factores afecten este porcentaje inicial de inversión, tales como pérdidas en los conectores de la fibra ó una temperatura inadecuada. Sin embargo, en el caso de un simulador, donde estos parámetros están controlados, es posible que se haya utilizado una densidad de dopaje inadecuada, es decir, un número de iones superior al que el haz de bombeo utilizado logra excitar.

Respecto al comportamiento a lo largo de la fibra, se observa un comportamiento esperado, donde a medida que se avanza en la fibra se reduce el número de iones excitados, ya que el haz de bombeo que alcanza estas regiones de la fibra tiene una menor intensidad comparativamente con su estado al inicio de la fibra.

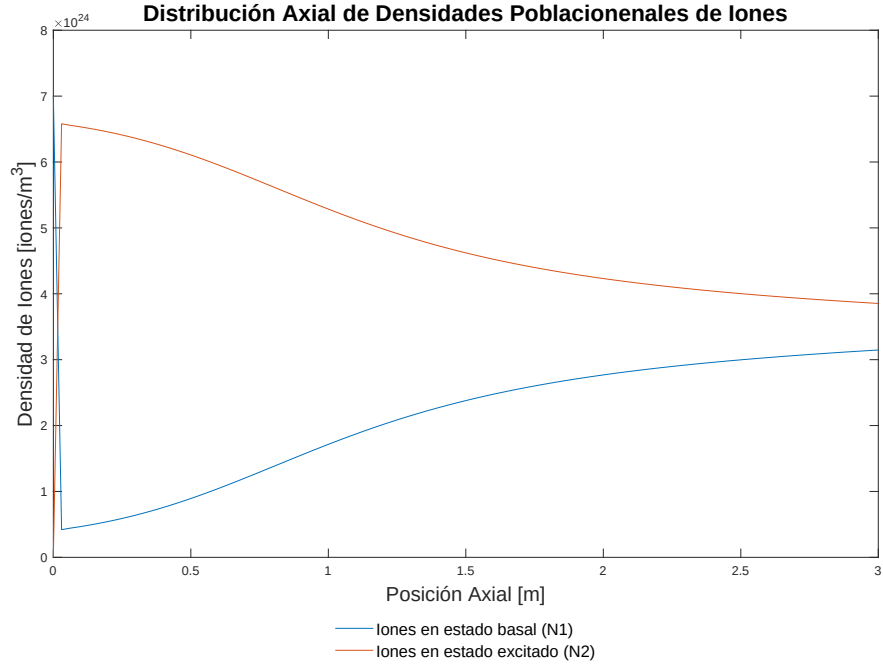


Figura 3.2: Distribución longitudinal de las densidades poblacionales de Iones.

La distribución espectral de ganancia de los 20 canales equiespaciados de señal en los modos espaciales LP01, en color azul y LP11, en color naranja, a la salida del amplificador se muestra en la Figura 3.3. El eje vertical izquierdo cuantifica las ganancias en dB para cada canal de señal en ambos modos, mientras que el eje derecho cuantifica la diferencia de ganancia entre las simulaciones en Matlab y VPIphotonics. La mayor diferencia entre ambas simulaciones para el modo LP01 fue de 0.3742 dB obtenida por el canal de 1530 nm. Para el modo LP11a la mayor diferencia fue de 0.3461 dB obtenida en el canal de 1559 nm.

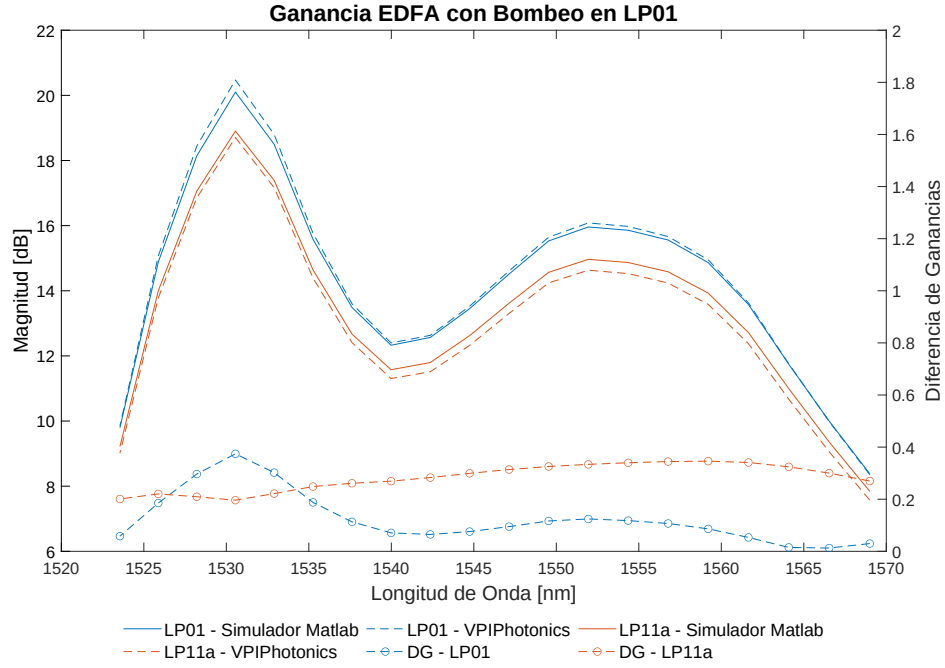


Figura 3.3: Comparación de ganancias para los modos LP01 y LP11a.

Las figuras 3.4 y 3.5 muestran la evolución de las potencias de los canales de señal para el modo LP01 y LP11a respectivamente, a lo largo de la fibra dopada simuladas mediante Matlab y VPIphotonics. Se observa que en ambas simulaciones el resultado es muy similar, tal como indica el gráfico de ganancias 3.3.

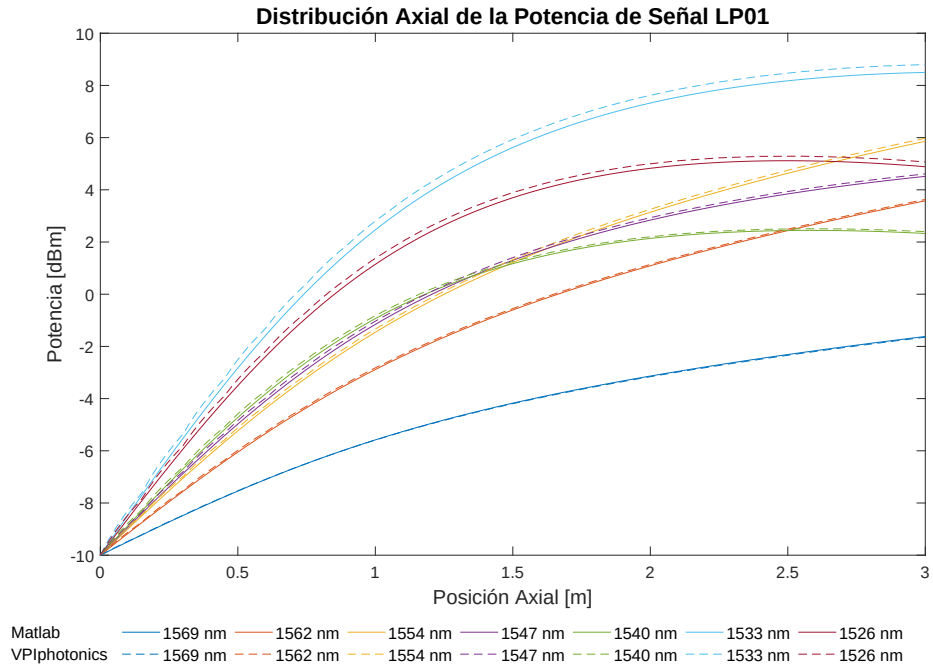


Figura 3.4: Distribución de la potencia de señal a lo largo del EDFA en el modo LP01.

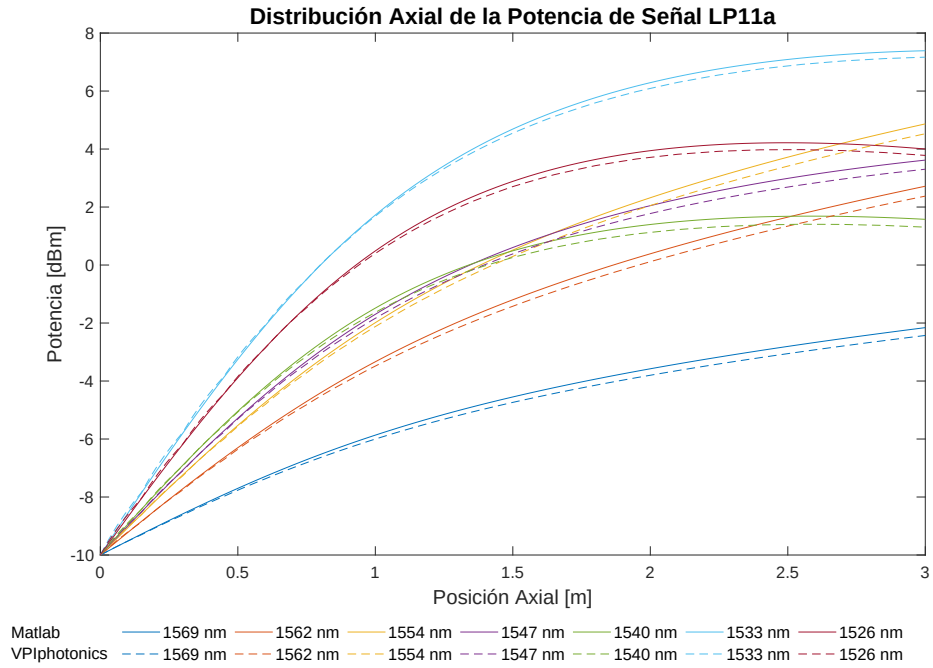


Figura 3.5: Distribución de la potencia de señal a lo largo del EDFA en el modo LP11a.

La propagación del ruido ASE para los modos LP01 y LP11a se muestra en las figuras 3.6 y 3.7 respectivamente, para las simulaciones en Matlab y VPIphotonics. En ambos casos se utilizó un ruido ASE de entrada de -200 dBm como se muestra en la Tabla 3.1.

Para el modo LP01, la diferencia máxima entre ambas simulaciones fue en el canal de 1540 nm, obteniéndose valores a la salida del EDFA de -27.58 dBm y -26.48 dBm para la simulación en Matlab y VPIphotonics respectivamente.

Para el segundo caso, con el modo LP11a, la diferencia máxima entre ambas simulaciones fue en el canal de 1547 nm, obteniéndose valores a la salida del EDFA de -27.69 dBm y -26.62 dBm para la simulación en Matlab y VPIphotonics respectivamente.

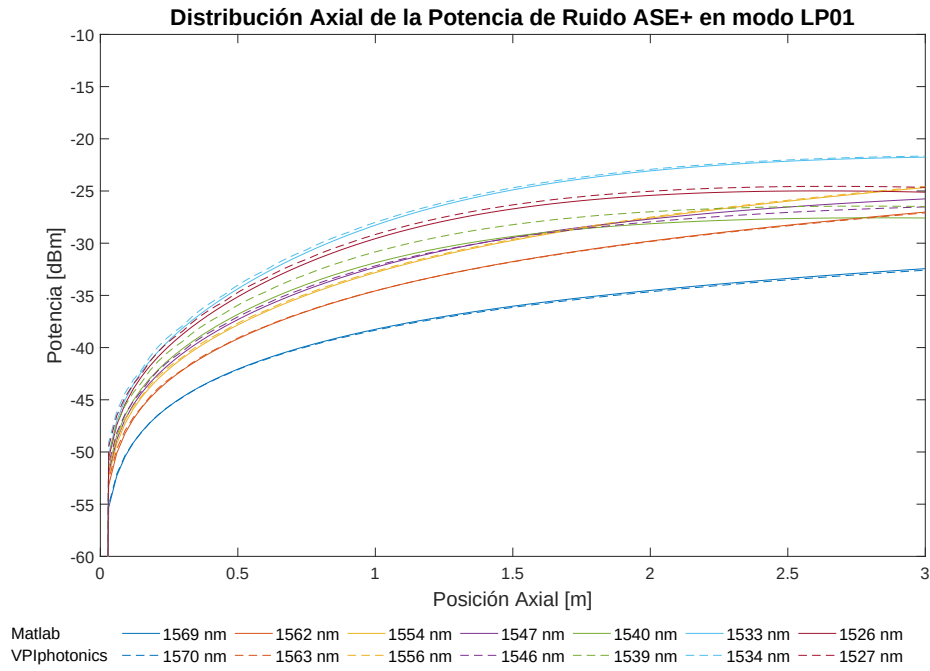


Figura 3.6: Distribución de la potencia de ruido ASE a lo largo del EDFA en el modo LP01.

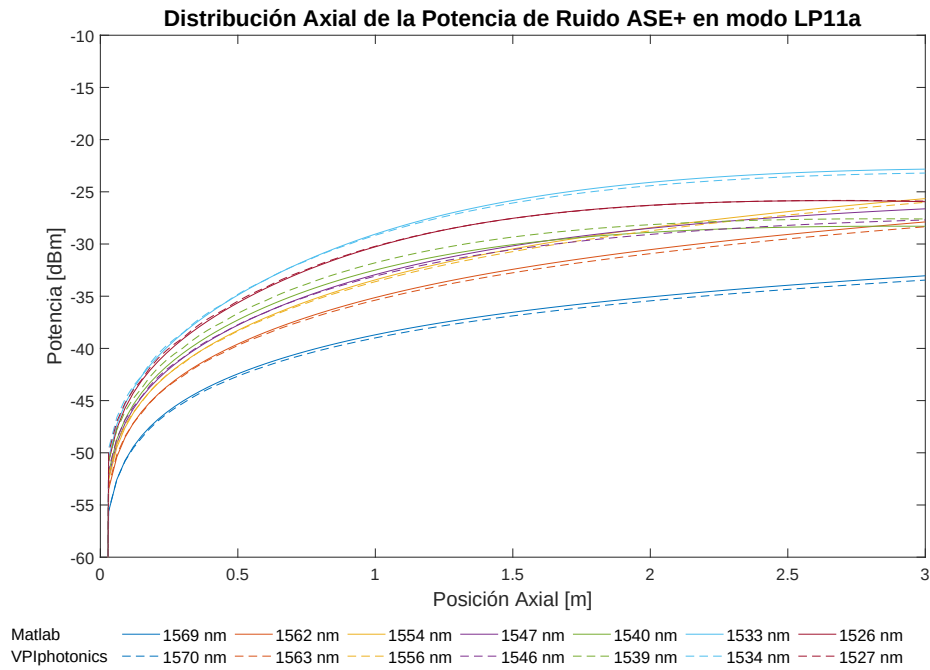


Figura 3.7: Distribución de la potencia de ruido ASE a lo largo del EDFA en el modo LP11a.

Los gráficos de las figuras 3.6 y 3.7 muestran únicamente el ruido ASE en sentido de co-propagación respecto a la señal, esto es debido a que el software VPIphotonics no realiza la simulación del ruido ASE en sentido opuesto. Sin embargo, mediante las simulaciones en Matlab, es posible simular esta onda. Los resultados se muestran en las figuras 3.8 y 3.9 para los modos LP01 y LP11a respectivamente.

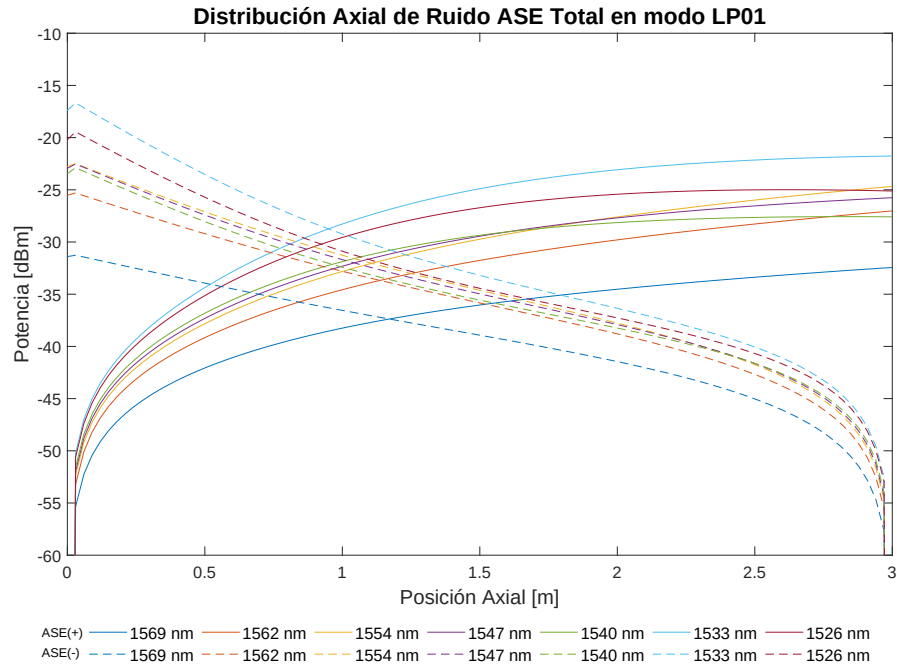


Figura 3.8: Distribución de la potencia de ruido ASE total a lo largo del EDFA en el modo LP01.

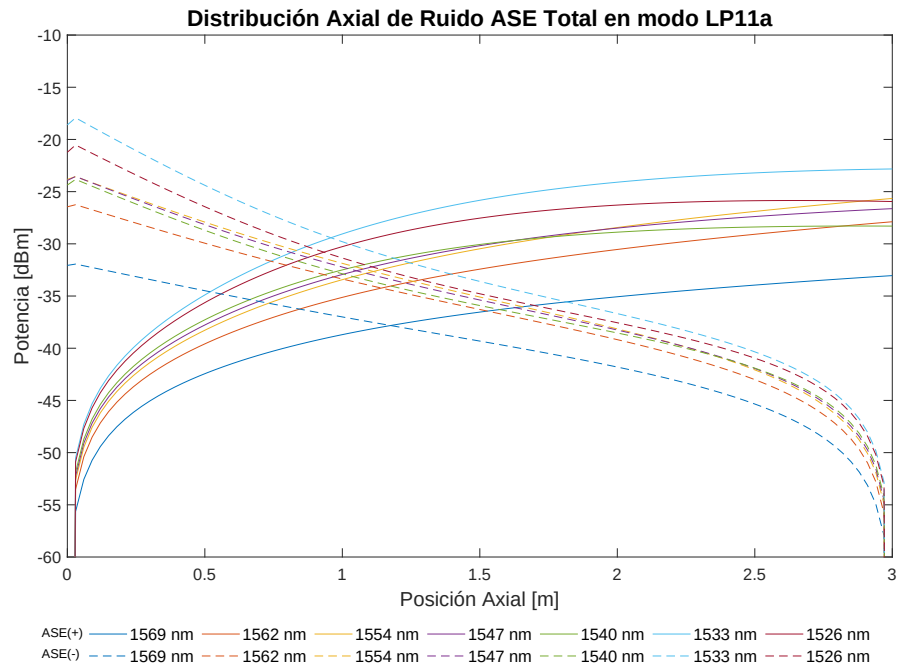


Figura 3.9: Distribución de la potencia de ruido ASE total a lo largo del EDFA en el modo LP11a.

Finalmente, se comparan los resultados obtenidos por ambos simuladores para la figura de ruido del amplificador (NF) en los modos LP01 y LP11, la cual se muestra en la Figura 3.10. Esta magnitud se calcula según la ecuación (3.2) en función de la relación señal a ruido óptica (OSNR: Optical Signal Noise Ratio) definida en la ecuación (3.1). Donde P_s y P_{ASE} son las potencias de señal y ruido ASE, respectivamente, para un canal y modo dado.

$$OSNR = \frac{P_s}{P_{ASE}} \quad (3.1)$$

$$NF = \frac{OSNR(in)}{OSNR(out)} = \frac{P_s(in)/P_{ASE}(in)}{P_s(out)/P_{ASE}(out)} \quad (3.2)$$

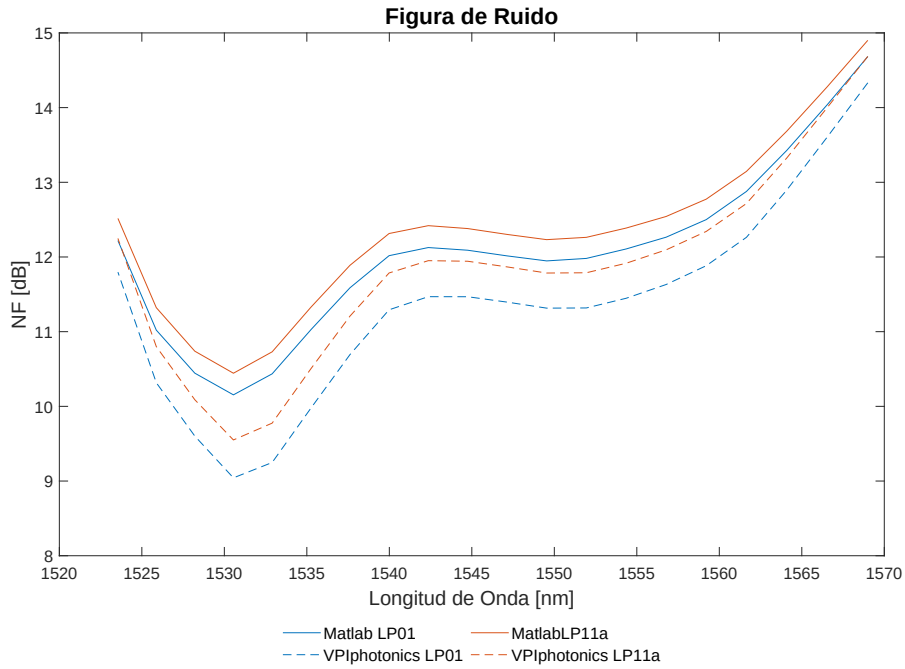


Figura 3.10: Figura de ruido del EDFA para los modos LP01 y LP11.

La mayor diferencia entre ambas simulaciones ocurrió en el canal de 1532 nm. Para el modo LP01 se obtuvieron los valores de 10.43 dB y 9.24 dB para las simulaciones en Matlab y VPIphotonics respectivamente, mientras que para el modo LP11a se obtuvieron valores de 10.73 dB y 9.77 dB en Matlab y VPIphotonics respectivamente.

3.1.2 Bombeo en modo LP12a

Como segunda validación, se utiliza también el software VPIphotonics, utilizando parámetros de fibra, bombeo y señal diferentes a los del primer caso. Estos nuevos parámetros se detallan en las tablas 3.3 y 3.4.

<i>Parámetros de entrada al simulador</i>	<i>Valores utilizados</i>
Parámetros del EDFA	
Largo de la fibra	5 [m]
Radio de la fibra	5.5 μm
Densidad de iones de Erbio	7 $\times 10^{24}$ [iones/m ³]
Índice refracción del núcleo (n_1)	1.45
Índice de refracción del revestimiento (n_2)	1.4354
Apertura numérica	0.2051
Potencia de ruido ASE a la entrada	-200 dBm

Tabla 3.3: Parámetros de fibra en EDFA

<i>Parámetros de entrada al simulador</i>	<i>Valores utilizados</i>	
	Haces de señal	Haces de bombeo
Número de canales	50	1
Longitudes de onda	[1548.2 , 1568] nm	980 nm
Modos espaciales	LP01 , LP11a	LP12a
Potencia de entrada	0 dBm	1000 mW
Separación entre canales	50 GHz	-

Tabla 3.4: Parámetros de las señales de entrada

Respecto al primer caso planteado, en esta segunda ocasión el amplificador es de 5 m de largo y el radio del núcleo es ligeramente más grande. El bombeo sigue siendo en un único haz pero esta vez en el modo LP12a y con una potencia de entrada de 1000 mW. Los canales de señal, que ahora son 50 en lugar de 20, están en una ventana ligeramente mas estrecha del espectro electromagnético y su potencia de entrada es mayor a la utilizada en el caso anterior.

De igual forma que en el caso anterior, se presenta la evolución de los haces de bombeo simulados en Matlab y VPIphotonics en la Figura 3.11.

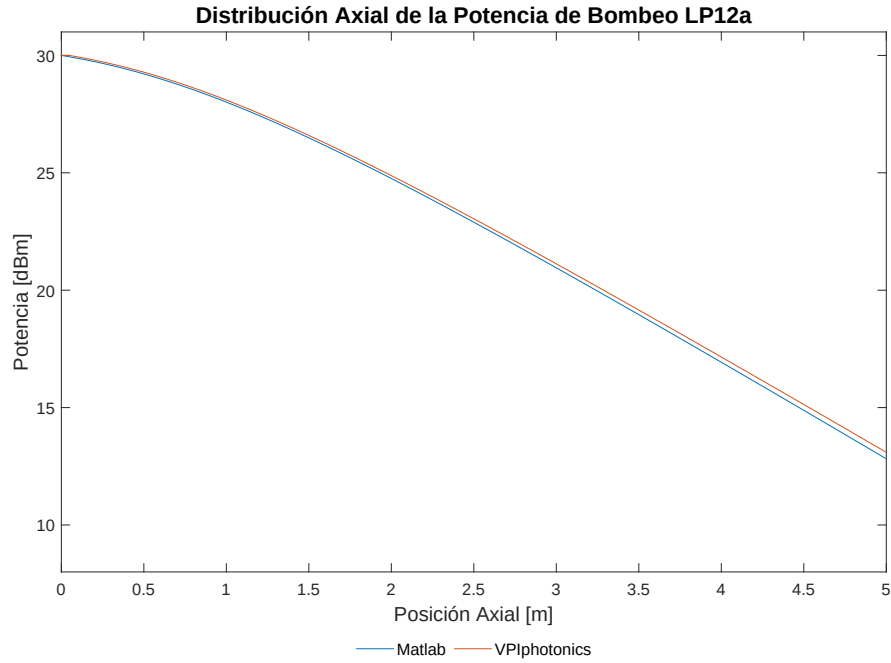


Figura 3.11: Distribución longitudinal de la potencia de bombeo.

Esta potencia de bombeo genera una distribución de las densidades poblacionales de iones de Erblio en los niveles N1 (estado excitado) y N2 (estado basal) a lo largo del amplificador, la que se muestra en la Figura 3.12. Tal como en la sección anterior, no fue posible obtener los datos de la distribución simulada en VPIphotonics, sin embargo, se obtuvo la distribución longitudinal de la distribución porcentual de iones en estado excitado, la cual se compara en la Figura 3.13.

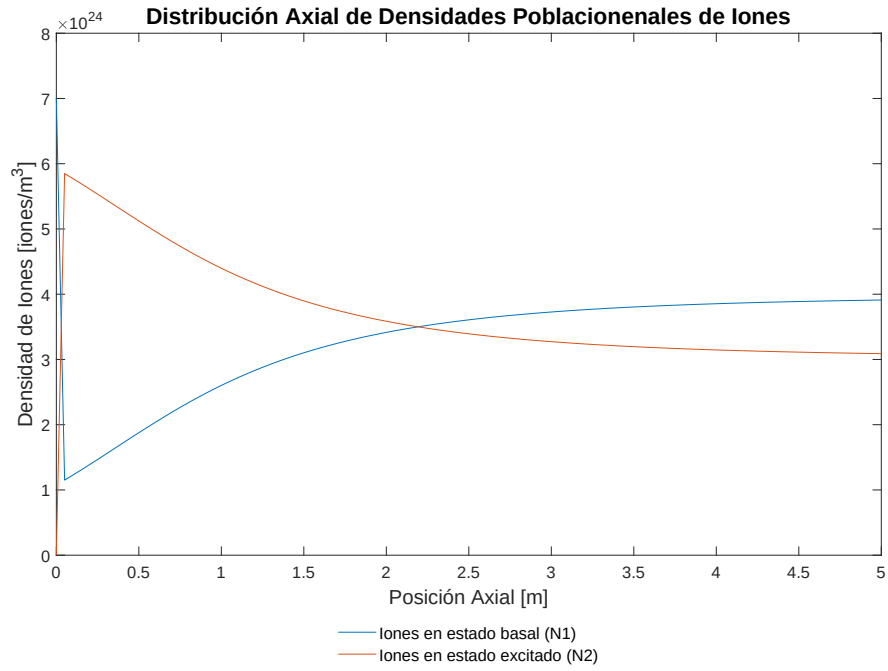


Figura 3.12: Distribución longitudinal de las densidades poblacionales de iones.

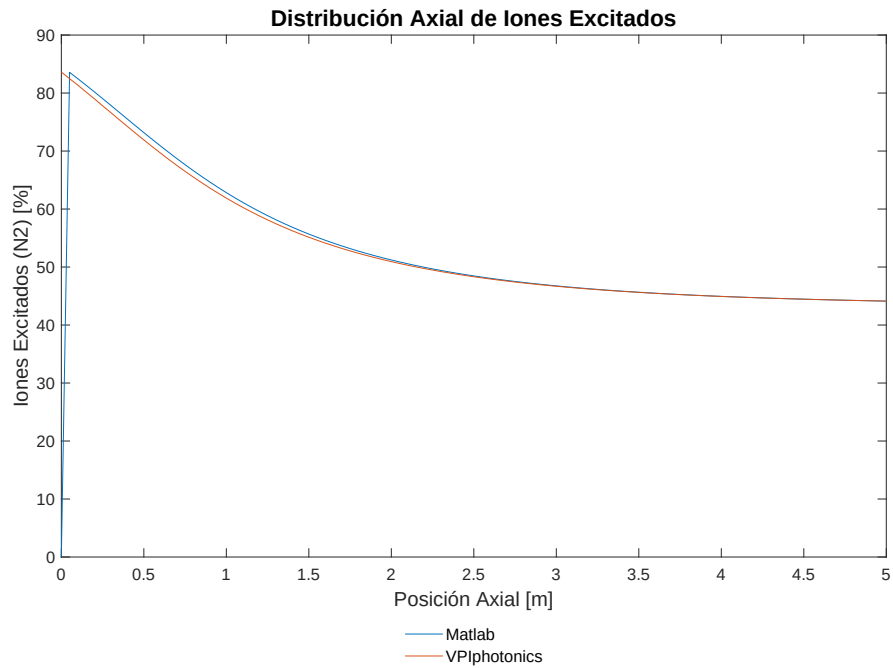


Figura 3.13: Distribución longitudinal del porcentaje de iones en estado excitado.

Comparado con el caso anterior, el porcentaje inicial de iones excitados es notoriamente inferior, esto se relaciona con el modo espacial del haz de bombeo, que cubre un porcentaje inferior de la fibra en el plano radial, respecto al modo LP01 utilizado para el caso anterior. Esto se traduce en que una región menor de iones de Erblio son alcanzados con la intensidad suficiente para una correcta inversión poblacional, aún cuando la potencia de bombeo es exageradamente mayor. El comportamiento hacia el interior de la fibra, tal como en el caso anterior, es el esperado.

Las ganancias de los 50 canales de señal equiespaciados entre 1548.2 y 1568 nm en los modos LP01 y LP12a, en colores azul y rojo respectivamente, se muestran en la Figura 3.14 cuantificadas en el eje vertical izquierdo. El eje vertical derecho cuantifica las diferencias de ganancias entra las simulaciones. Las diferencias entre ambas simulaciones no superan los 0.3 dB en ninguno de los 2 modos espaciales.

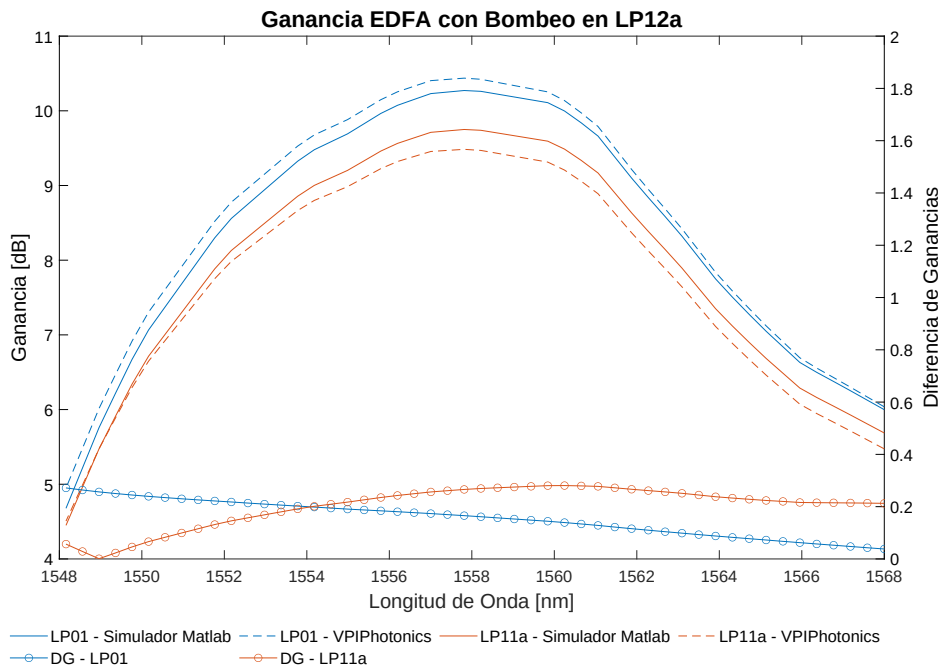


Figura 3.14: Comparación de ganancias para los modos LP01 y LP11a.

Las figuras 3.15 y 3.16 muestran la evolución de las potencias de algunos de los 50 canales de señal, para los modos LP01 y LP11a respectivamente, simuladas mediante Matlab y VPIphotonics. Estas evoluciones se grafican respecto a la posición a lo largo de la fibra dopada. Se observa que en ambas simulaciones el resultado es muy similar, tal como indica el gráfico de ganancias 3.14.

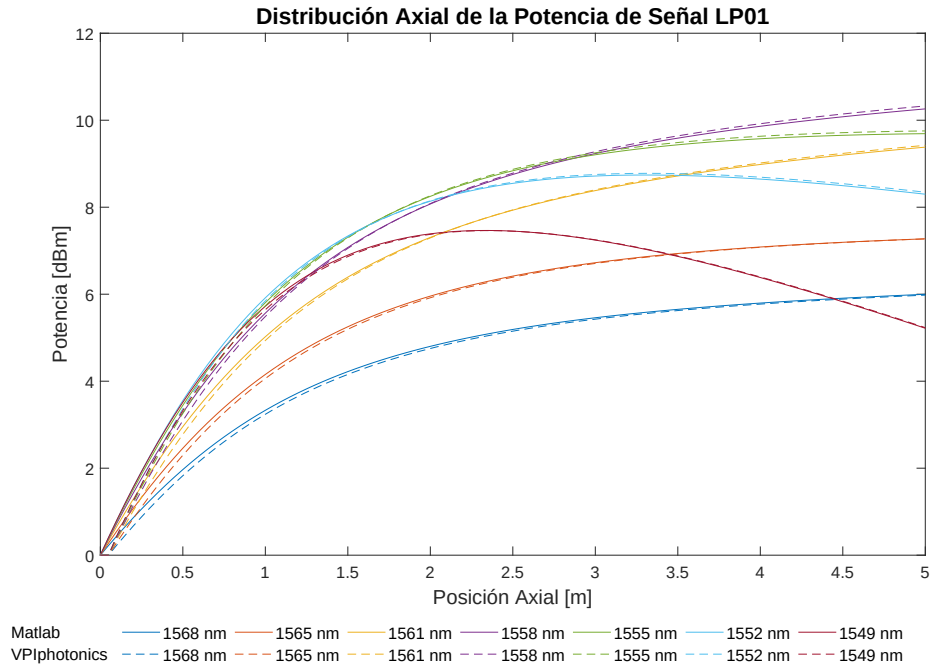


Figura 3.15: Distribución de la potencia de señal a lo largo del EDFA en el modo LP01.

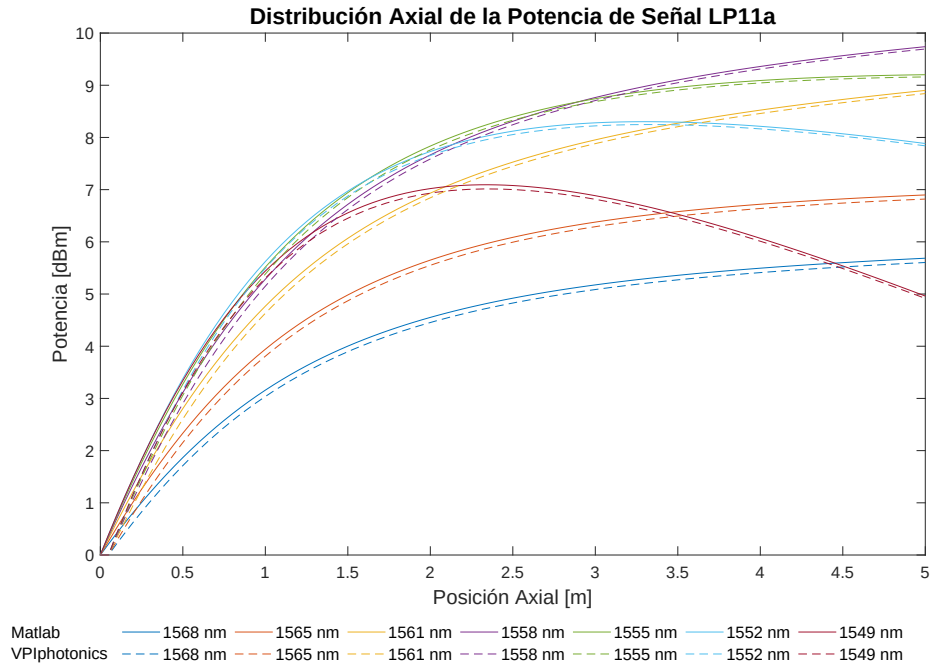


Figura 3.16: Distribución de la potencia de señal a lo largo del EDFA en el modo LP11a.

De igual forma que en la comparación anterior, se comparan las propagaciones del ruido ASE generado en ambas simulaciones, con un valor de entrada de -200 dBm. Estas se muestran en las figuras 3.17 y 3.18 para los modos LP01 y LP11a, respectivamente.

Para el modo LP01, la diferencia máxima entre ambas simulaciones fue en el canal de 1561 nm, obteniéndose valores a la salida del EDFA de -37.43 dBm y -36.688 dBm para la simulación en Matlab y VPIphotonics, respectivamente.

Para el segundo caso, con el modo LP11a, la diferencia máxima entre ambas simulaciones fue en el canal de 1552 nm, obteniéndose valores a la salida del EDFA de -38.26 dBm y -38.99 dBm para la simulación en Matlab y VPIphotonics, respectivamente.

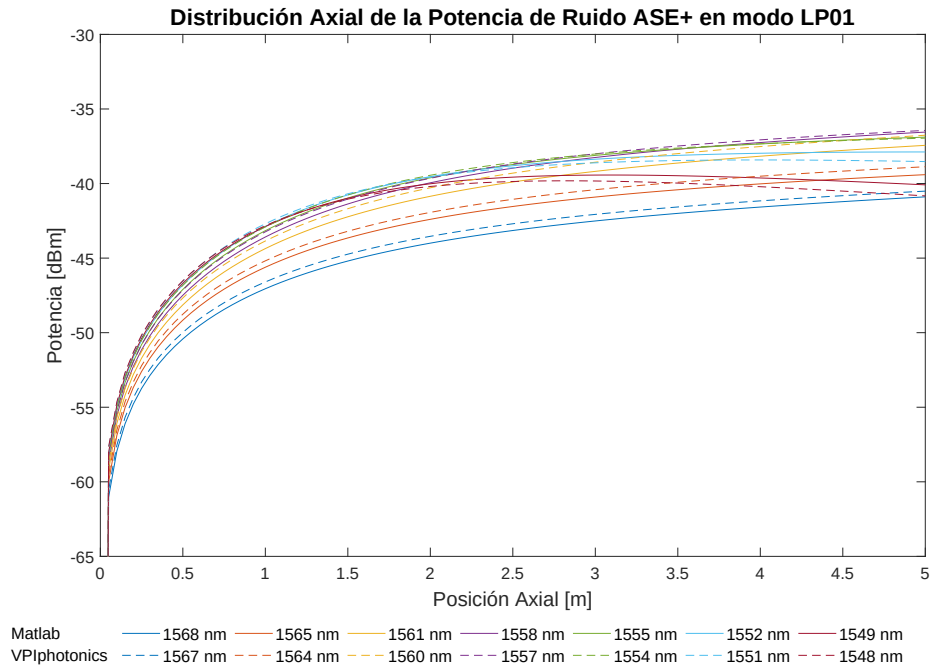


Figura 3.17: Distribución de la potencia de ruido ASE a lo largo del EDFA en el modo LP01.

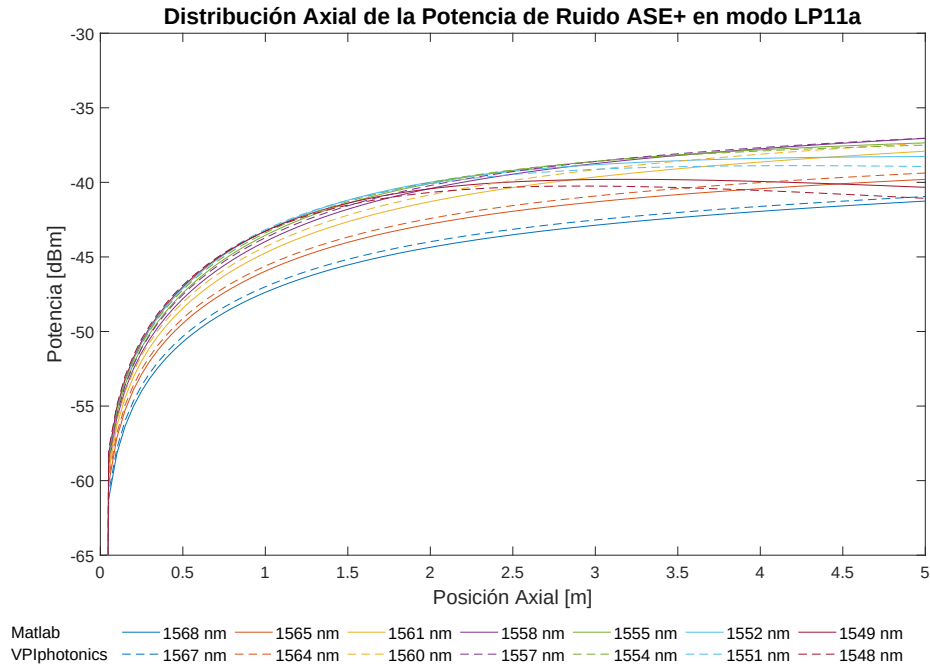


Figura 3.18: Distribución de la potencia de ruido ASE a lo largo del EDFA en el modo LP11a.

De igual forma que en el caso anterior, el ruido ASE en sentido contra-propagante no se simula en VPIphotonics, sin embargo en Matlab si se toma en cuenta este efecto que se muestra en las figuras 3.19 y 3.20 para los modos LP01 y LP11a, respectivamente.

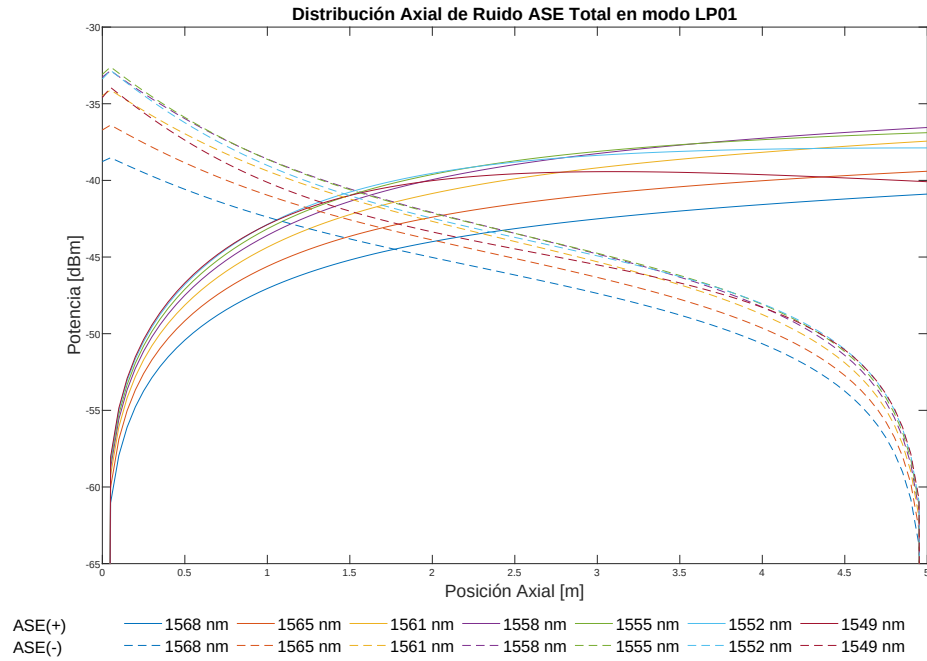


Figura 3.19: Distribución de la potencia de ruido ASE Total a lo largo del EDFA en el modo LP01.

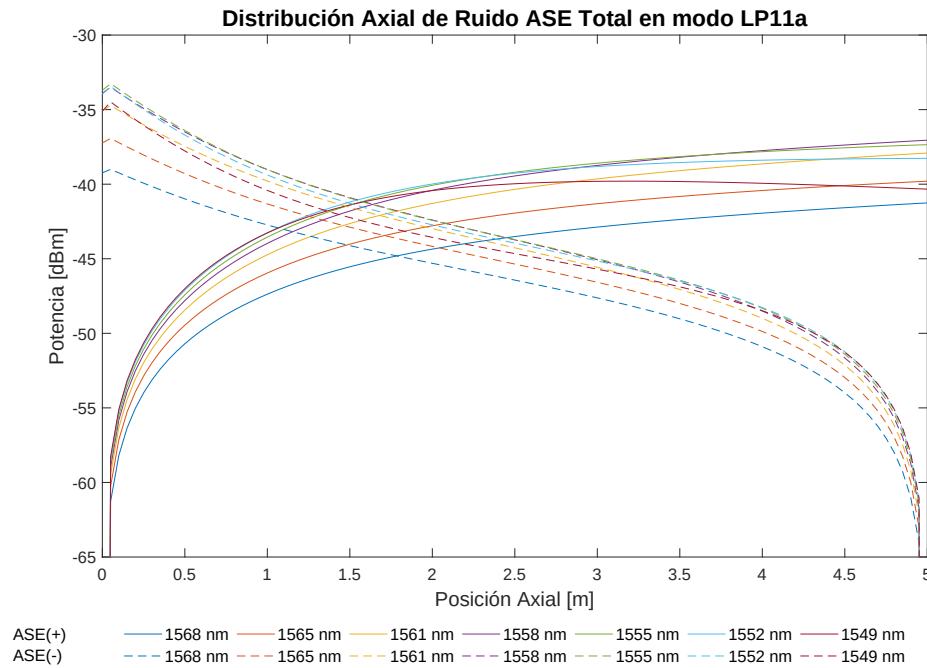


Figura 3.20: Distribución de la potencia de ruido ASE Total a lo largo del EDFA en el modo LP11a.

Finalmente, se comparan los resultados obtenidos por ambos simuladores para la figura de ruido del amplificador (NF) utilizando bombeo en modo LP12a, en los modos de señal LP01 y LP11, la cual se muestra en la Figura 3.21. La figura de ruido se calcula utilizando la ecuación (3.2). Es importante destacar que estos niveles de ruido generado en el amplificador son muy superiores a los niveles esperados, esto se relaciona con la magnitud del ruido de entrada a la fibra, que es muy inferior al rango normal esperado para estos casos.

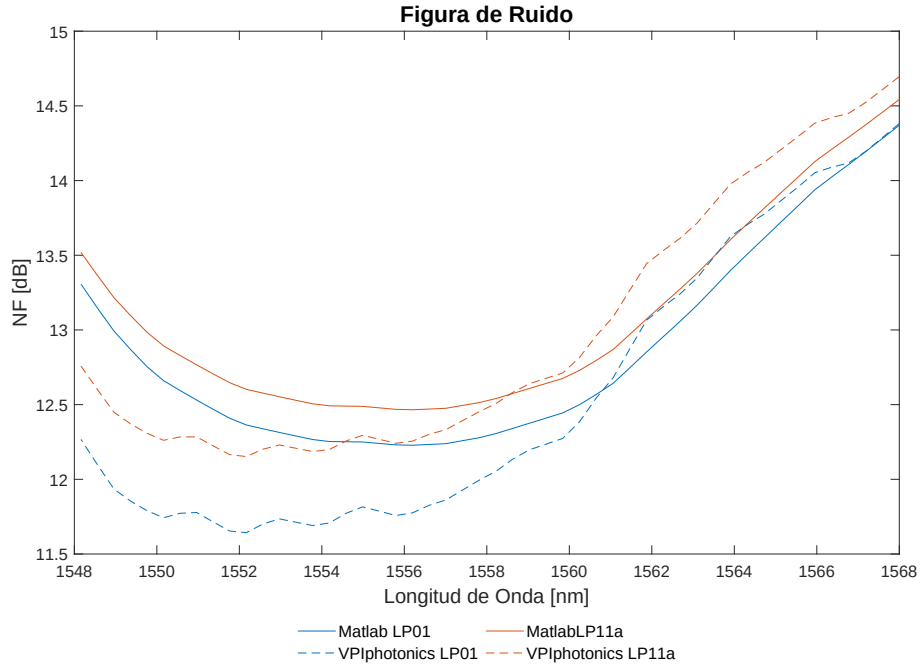


Figura 3.21: Figura de ruido del EDFA para los modos LP01 y LP11a.

La mayor diferencia entre ambas simulaciones ocurrió en el canal de longitud de onda 1549 nm. Para el modo LP01 se obtuvieron los valores de 12.99 dB y 11.93 dB para las simulaciones en Matlab y VPIphotonics, respectivamente, mientras que para el modo LP11a se obtuvieron valores de 13.21 dB y 12.44 dB en Matlab y VPIphotonics, respectivamente.

3.1.3 Ajuste de los parámetros en casos mostrados anteriormente

Ambos casos mostrados anteriormente fueron replicados de los ejemplo que entrega el software comercial VPIphotonics, por lo cual se decidió no modificar ninguno de los parámetros de entrada allí presentes bajo el supuesto de que estos ejemplos han sido validados por los desarrolladores del software comercial. Sin embargo, para fines prácticos, estos parámetros de entrada para el amplificador no son del todo realistas.

Ambos casos toman un valor de ruido ASE de entrada de -200 dBm; es decir, un valor “nulo” para el ruido a la entrada del amplificador y en cualquier sistema real esto no será así. Por esta razón se ajustó, para ambos casos, a un valor mas realista, de -58 dBm. Junto a esto, el segundo caso utiliza una potencia de bombeo a 1 W y potencias por canal de entrada de 0 dBm, esto se traduce en un amplificador completamente saturado. Por esta razón, se reajustó la potencia de bombeo a 250 mW, y las potencias por canal de señal a -10 dBm, similar a los casos de estudio presentados hacia el final del documento.

Los nuevos parámetros se presentan en las Tablas 3.5 y 3.6, para ambos casos anteriormente detallados:

Parámetros de entrada al simulador	Valores Utilizados	
	Haces de señal	Haz de bombeo
Número de canales	20	1
Rango de longitud de onda	[1523.55 , 1569] nm	980 nm
Modos espaciales	LP01, LP11a	LP01
Potencias de entrada	-10 dBm	250 mW
Separación entre canales	300 GHz	-
	Ruido ASE	
Potencia de ruido ASE a la entrada	-58 dBm	
	Parámetros de la fibra	
Largo de la fibra	3 m	
Radio de la fibra	5 μm	
Apertura numérica	0.2051	

Tabla 3.5: Parámetros ajustados de para el primer caso

Parámetros de entrada al simulador	Valores Utilizados	
	Haces de señal	Haz de bombeo
Número de canales	50	1
Rango de longitud de onda	[1548.2 , 1568] nm	980 nm
Modos espaciales	LP01, LP11a	LP12a
Potencias de entrada	-10 dBm	250 mW
Separación entre canales	50 GHz	-
	Ruido ASE	
Potencia de ruido ASE a la entrada	-58dBm	
	Parámetros de la fibra	
Largo de la fibra	5 m	
Radio de la fibra	5.5 μm	
Apertura numérica	0.2051	

Tabla 3.6: Parámetros ajustados para el segundo caso

Los parámetros asociados al amplificador no fueron modificados, lo que puede comprobarse revisando las Tablas 3.1 y 3.3, respectivamente para los casos de bombeo en el modo LP01 y LP12a.

Con estos nuevos parámetros, se obtienen resultados realistas para la OSNR y figura de ruido en ambos casos, acotando esta último a un rango entre 3 a 5 dB. Estos resultados se muestran en las figuras 3.22 y 3.23 para el primer caso, que utiliza un haz de bombeo en el modo LP01. EL segundo caso, que utiliza un haz de bombeo en el modo LP12a, se tienen las figuras 3.24 y 3.25 para la OSNR y la figura de ruido, respectivamente.

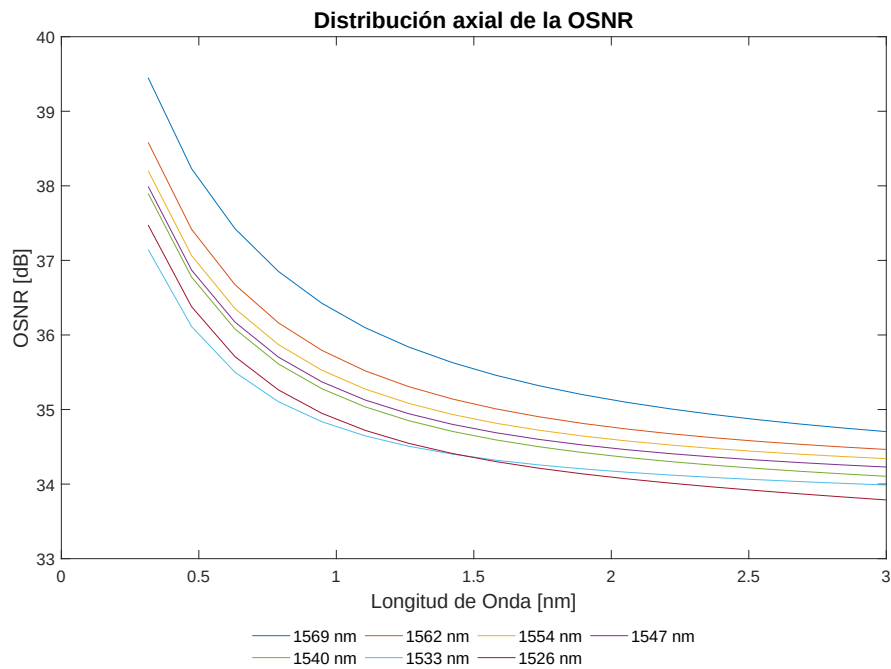


Figura 3.22: Caso 1: OSNR para los modos LP01 y LP11a.

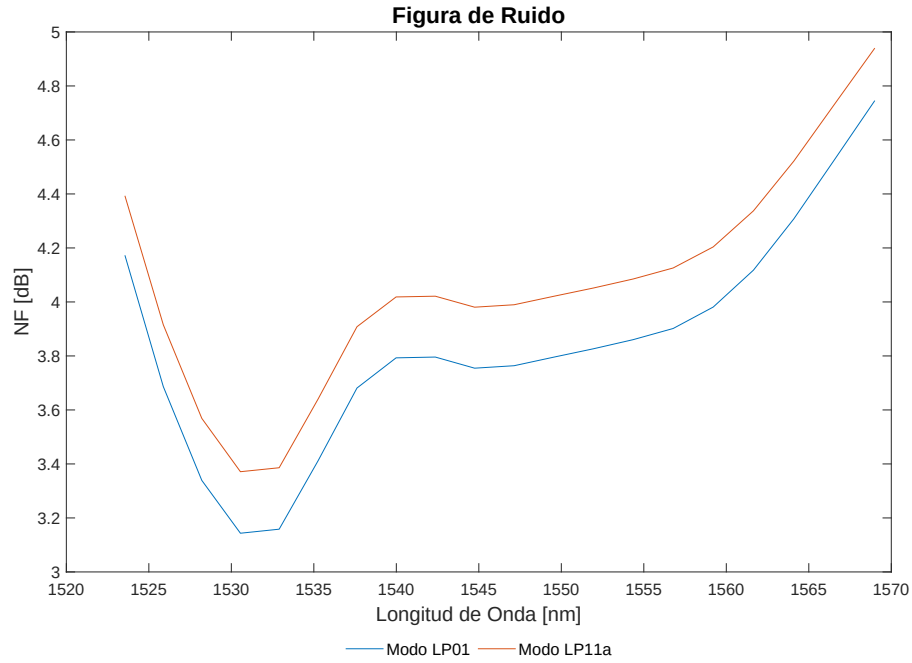


Figura 3.23: Caso 1: Figura de ruido para los modos LP01 y LP11a.

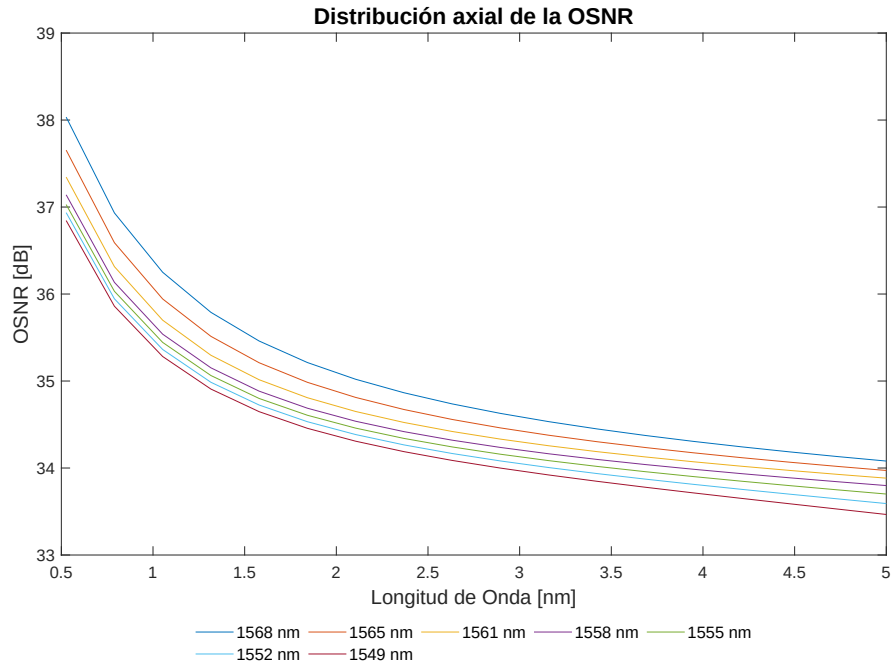


Figura 3.24: Caso 2: OSNR para los modos LP01 y LP11a.

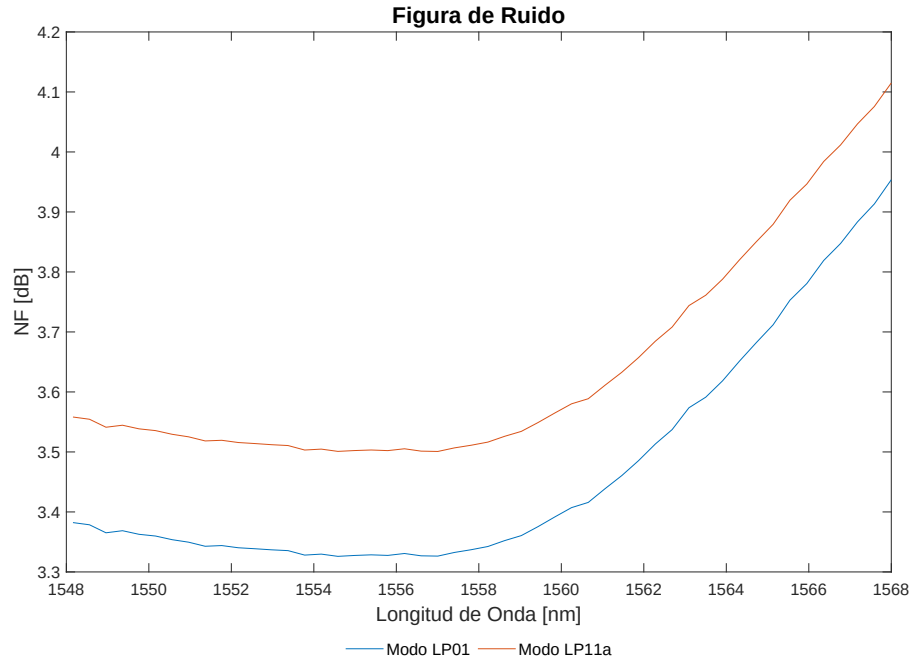


Figura 3.25: Caso 2: Figura de ruido para los modos LP01 y LP11a.

3.2 Caracterización del EDFA

Una vez validado el modelo matemático implementado para el EDFA, se debe encontrar un punto de operación sobre el cual trabajar y simular casos de interés. Este punto debe asegurar un correcto uso de la potencia de bombeo, para lo cual se debe asegurar el trabajo en la zona lineal del EDFA, evitando la saturación.

Los parámetros fijos utilizados en la fibra se muestran en la Tabla 3.7. Los demás parámetros tales como potencia de bombeo, potencia de señal por canal y largo del amplificador se determinan durante esta sección.

Parámetros del EDFA	Valores utilizados
Radio de la fibra	$5 \mu m$
Cantidad de iones de erbio	7×10^{24}
Índice refracción del núcleo (n_1)	1.45
Índice de refracción del revestimiento (n_2)	1.4354
Apertura numérica	0.2051
Potencia de ruido ASE a la entrada	-200 dBm

Tabla 3.7: Parámetros de la fibra dopada.

Con el fin de tener una noción inicial del comportamiento del amplificador y lograr una adecuada caracterización, se presentan en las figuras 3.26 y 3.27 que muestran el comportamiento del amplificador en función de la potencia de bombeo y el largo del amplificador. En la Figura 3.26, se muestra la ganancia en función del largo del EDFA, para diferentes potencias de bombeo entre 100 mW y 500 mW. La Figura 3.27 muestra la ganancia en función de la potencia de bombeo del EDFA, para diferentes largos

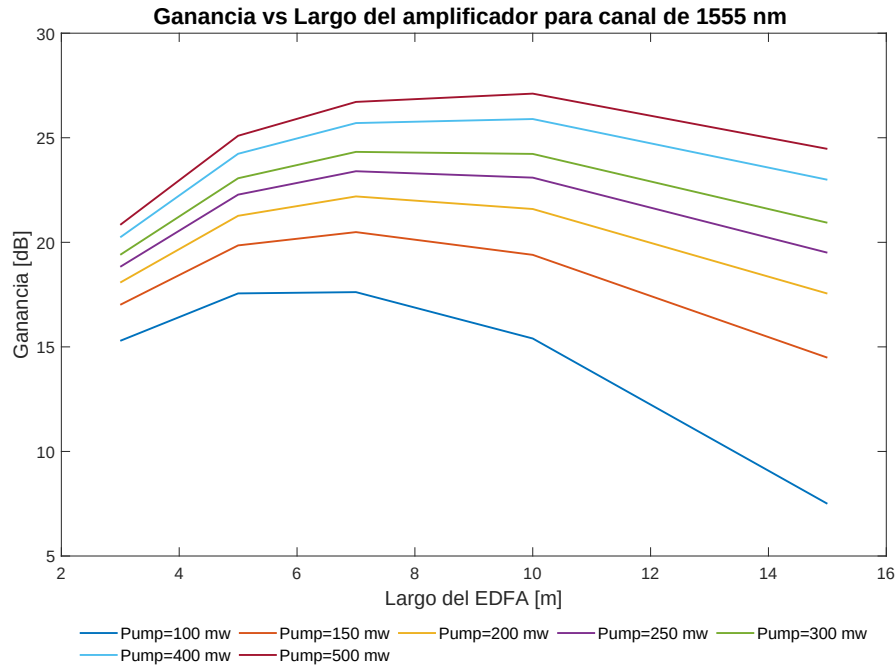


Figura 3.26: Ganancia vs largo del EDFA, para diferentes potencias de bombeo.

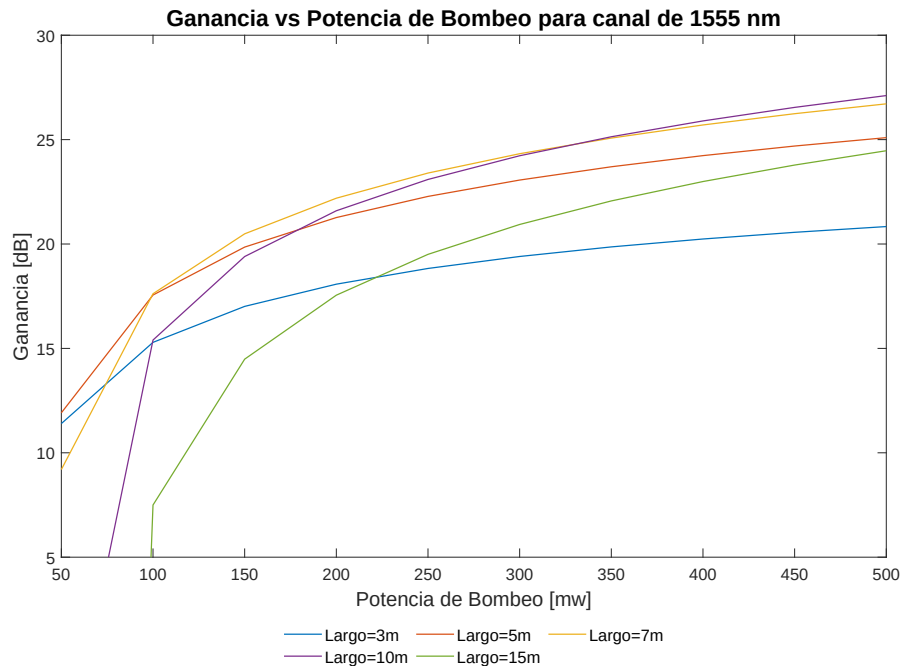


Figura 3.27: Ganancia vs potencia de bombeo, para diferentes largos del EDFA.

Estas curvas se generaron utilizando el canal de longitud de onda 1555 nm como referencia, ya que esta longitud de onda está en una zona de mayor homogeneidad de ganancia, alejada del peak en 1530 nm y del valle en 1545 nm, del espectro de emisión típico del EDFA.

Además, se utilizó una potencia de entrada suficientemente baja para asegurar que el EDFA trabaja en zona lineal, este punto se volverá a estudiar más adelante.

De las figuras presentadas, llaman la atención los largos de 5 y 10 metros, ya que no necesitan una potencia de bombeo tan elevada, como los amplificadores de mayor longitud, con una adecuada ganancia, del orden de los 17 a 25 dB.

Por esta razón, se calculan las curvas de potencia de salida vs potencia de entrada para ambos largos de amplificadores. Estas curvas se muestran en las figuras 3.28 y 3.29 para los EDFAs de 5 y 10 metros, respectivamente. De la Figura 3.26 se escogen las potencias de 100 y 200 mW para los largos mencionados.

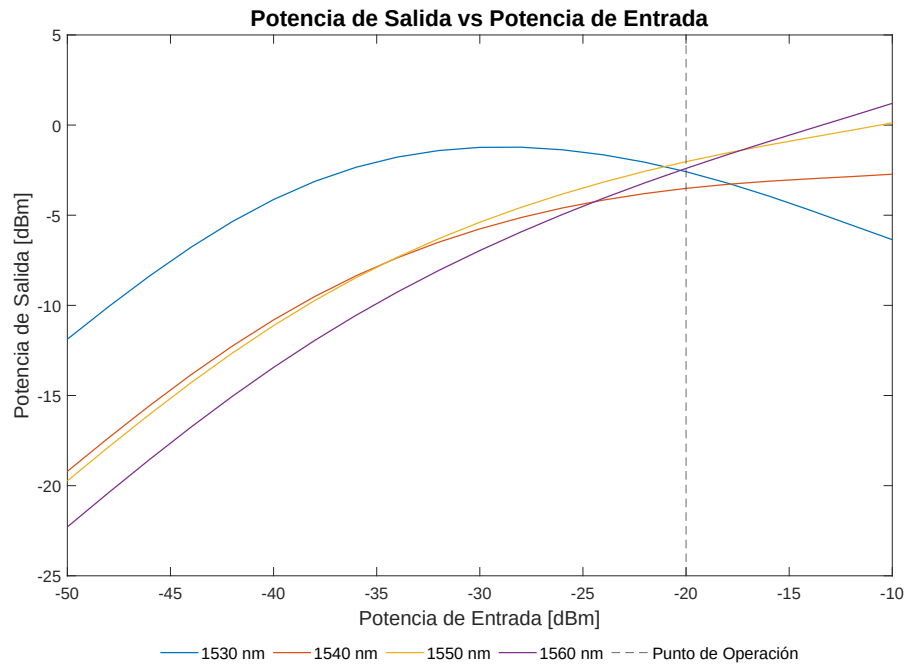


Figura 3.28: Potencia de salida vs potencia de entrada al EDFA de 5 metros de longitud, utilizando 100 mW de potencia de bombeo.

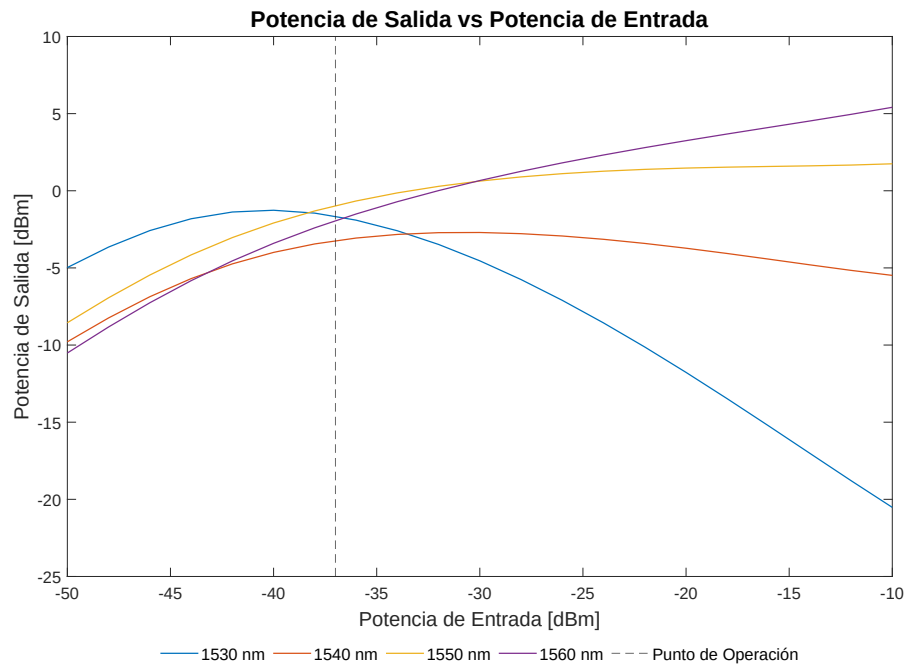


Figura 3.29: Potencia de salida vs potencia de entrada al EDFA de 10 metros de longitud, utilizando 200 mW de potencia de bombeo.

Estas figuras toman como eje independiente la potencia por canal; sin embargo, se generan utilizando los 62 canales; es decir, que la potencia total de entrada se obtiene multiplicando la potencia de entrada por 62 al trabajar en escala lineal. De estos gráficos se obtienen potencias óptima de operación, de -20 y -37 dBm por canal para los EDFAs de 5 y 10 metros, respectivamente. De esto se desprende que no es factible utilizar el EDFA de 10 metros para más de un span, debido a que su baja potencia de operación causa una muy baja OSNR a la salida del amplificador, como se describirá mas adelante. Por esta razón se decide utilizar el EDFA de 5 metros de longitud, con una potencia de bombeo de 100 mW y una potencia de entrada por canal de -20 dBm.

3.2.1 Ecualización de ganancia

Finalmente, con el amplificador debidamente caracterizado, se diseña un filtro de ecualización de ganancia (GEF: Gain Equalization Filter). El diseño del filtro toma como referencia a “Two-stage EDFA with Midstage GEF” utilizado por VPIphotonics. El filtro es un sistema que calcula el ripple de cada canal obtenido del espectro de ganancias a la salida del amplificador, con el cual ajusta sus parámetros de funcionamiento iterativamente hasta obtener un resultado con el margen deseado. Estos parámetros se refieren a una atenuación de ganancia diferente para cada longitud de onda. La Figura 3.30 muestra un diagrama de este.

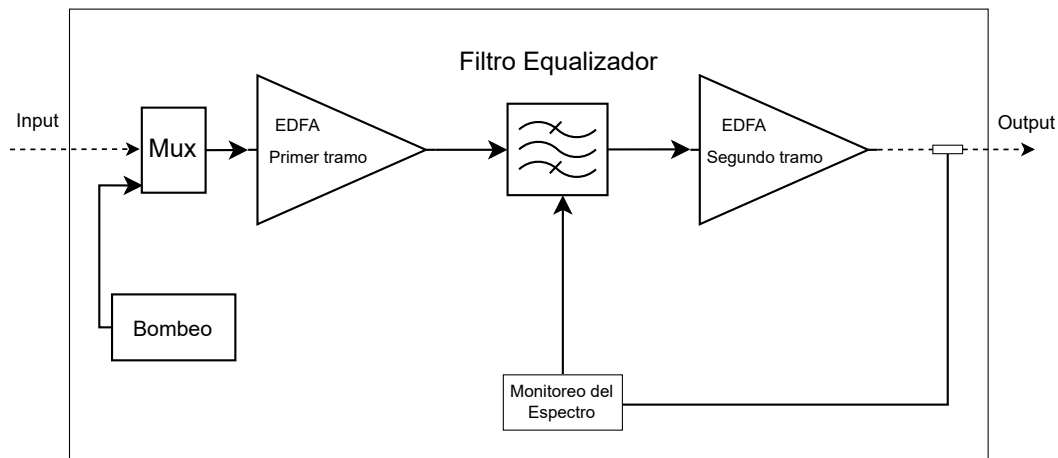


Figura 3.30: Filtro de ecualización inter etapa.

Los resultados al utilizar este filtro se muestran en la Figura 3.31 para los 62 canales mencionados anteriormente, repartidos equitativamente entre los modos LP01 y LP11a.

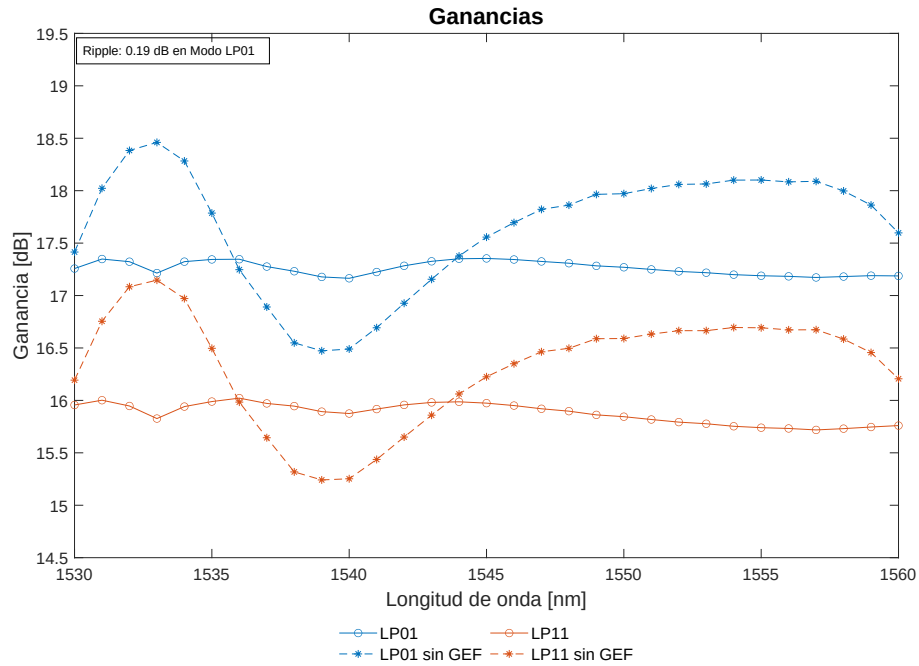


Figura 3.31: Comparación de ganancias al utilizar el filtro ecualizador (GEF).

Esta Figura demuestra que el filtro logra un ripple del espectro de ganancia bajo los 0.2 dB para el modo LP01 y un comportamiento prácticamente idéntico para el modo LP11a. La curva utilizada como filtro se muestra en la Figura 3.32. Esta curva representa la atenuación aplicada a los haces presentes en el EDFA y como es de esperarse tiene una forma muy similar al espectro de emisión para las mismas longitudes de onda. El valor peak del filtro introduce una atenuación de 2.2 dB aproximadamente.

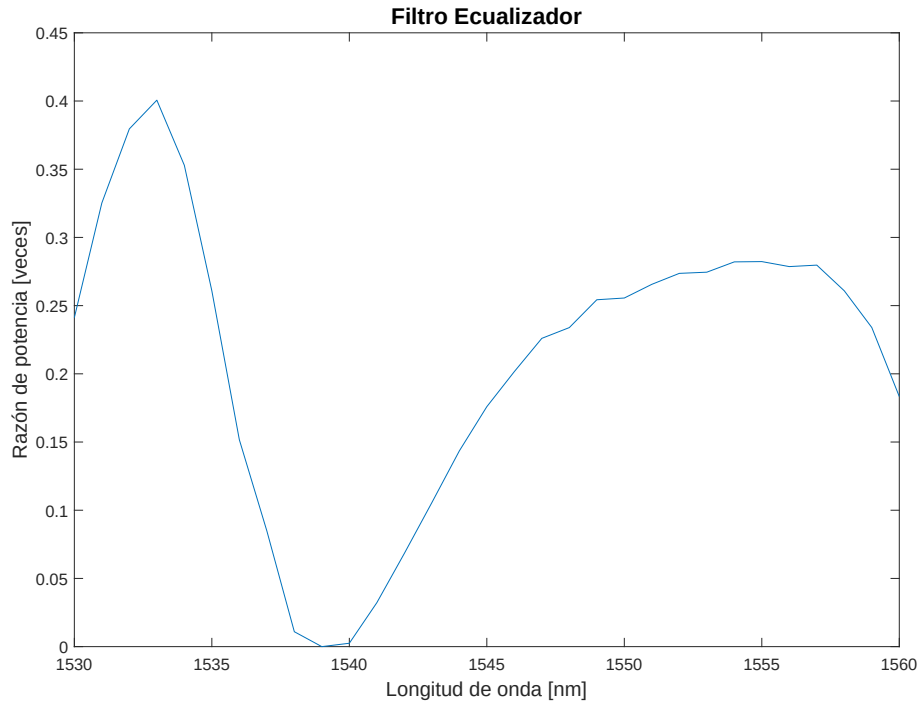


Figura 3.32: Función de transferencia del filtro ecualizador.

Este filtro, si bien se diseñó respecto al modo LP01, se aplica por igual a todos los modos y haces dentro del rango de longitudes de onda. Esto se decidió así ya que, en un sistema real, el filtro se aplicaría a toda señal presente en el amplificador. No es rentable separar los modos espaciales y aplicar a cada uno un filtro diferenciado. Cabe destacar también que, por la misma razón explicada anteriormente, el filtro se aplica también al ruido ASE presente en el amplificador, por lo que se obtiene la relación señal a ruido ecualizada mostrada en la Figura 3.33.

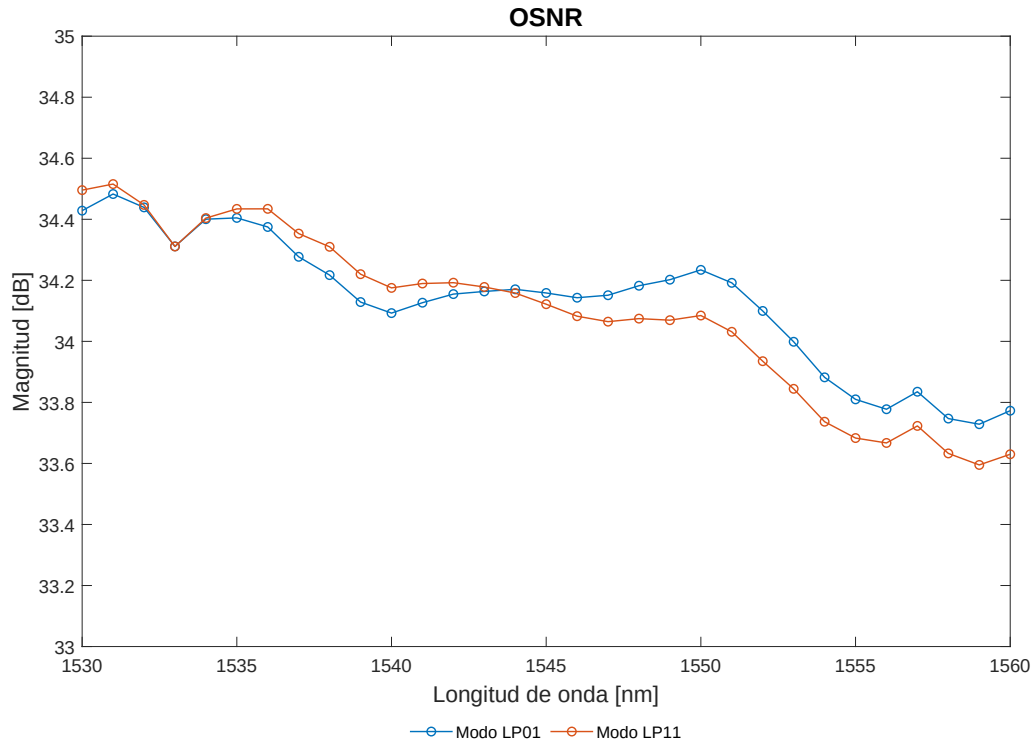


Figura 3.33: Relación señal a ruido óptica ecualizada.

Esta relación señal a ruido ecualizada, implica que tanto la señal como el ruido ASE se ven afectados de igual manera por el filtro. Esto es porque, tal como dice la Ecuación 3.1, la relación señal a ruido se calcula dividiendo la potencia de señal por la potencia de ruido; es decir, si estas señales no variasen por igual, se vería reflejado como una constante multiplicando al valor de la OSNR sin ecualizar.

3.3 Validación del DRFA

En segundo lugar, se evalúan los resultados obtenidos por el amplificador Raman distribuido. De igual forma que con el amplificador EDFA, la validación se realiza comparando los resultados obtenidos mediante el simulador Matlab con los resultados obtenidos con el software comercial VPIphotonics.

Para esta validación, el software comercial permite únicamente la simulación de amplificadores Raman monomodo, es por esta razón que todas las señales utilizadas en los dos casos presentados son simuladas en el modo LP01.

3.3.1 Primer caso: Bombeo Backward

Los parámetros de la fibra utilizada se detallan en la Tabla 3.8, mientras que los parámetros de los haces enviados se detallan en la Tabla 3.9. Además la Figura 3.34 muestra un esquema de la configuración utilizada.

<i>Parámetros de Entrada al Simulador</i>	<i>Valores Utilizados</i>
Parámetros de la fibra	
Largo de la fibra Raman	100 km
Radio de la fibra Raman	5.04626 μm
Coeficiente de atenuación	0.2 dB/km
Índice refracción del núcleo (n_1)	1.47
Índice de refracción del revestimiento (n_2)	1.42
Potencia de ruido ASE a la entrada	-200 dBm

Tabla 3.8: Parámetros de la fibra Raman.

<i>Parámetros de Entrada al Simulador</i>	<i>Valores Utilizados</i>	
	Haces de Señal	Haces de Bombeo
Número de canales	100	1
Longitudes de onda	[1500 , 1655] nm	1500 nm
Modos espaciales	LP01	LP01
Potencia de entrada	-30 dBm	300 mW
Dirección	Forward	Backward

Tabla 3.9: Parámetros de las señales de entrada

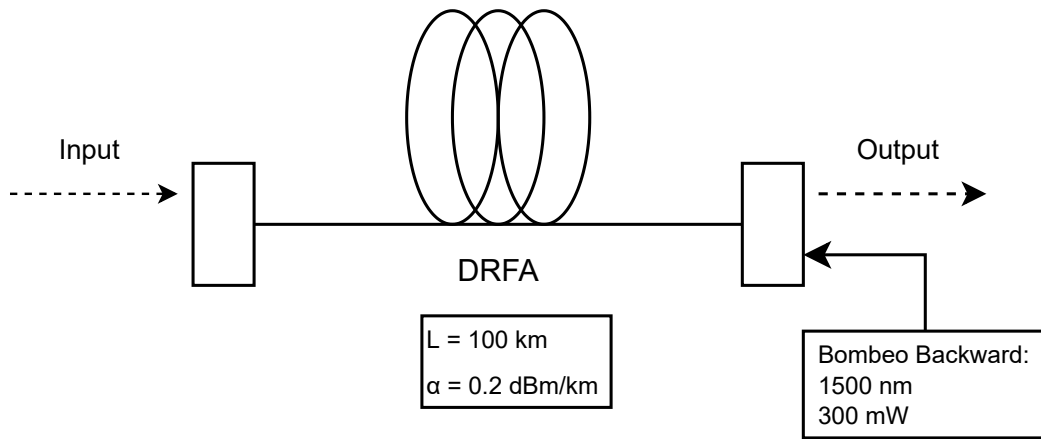


Figura 3.34: Esquema del caso 1 de la validación del amplificador Raman

En esta configuración, se obtiene la distribución mostrada en la Figura 3.35 para la potencia de bombeo a lo largo de la fibra.

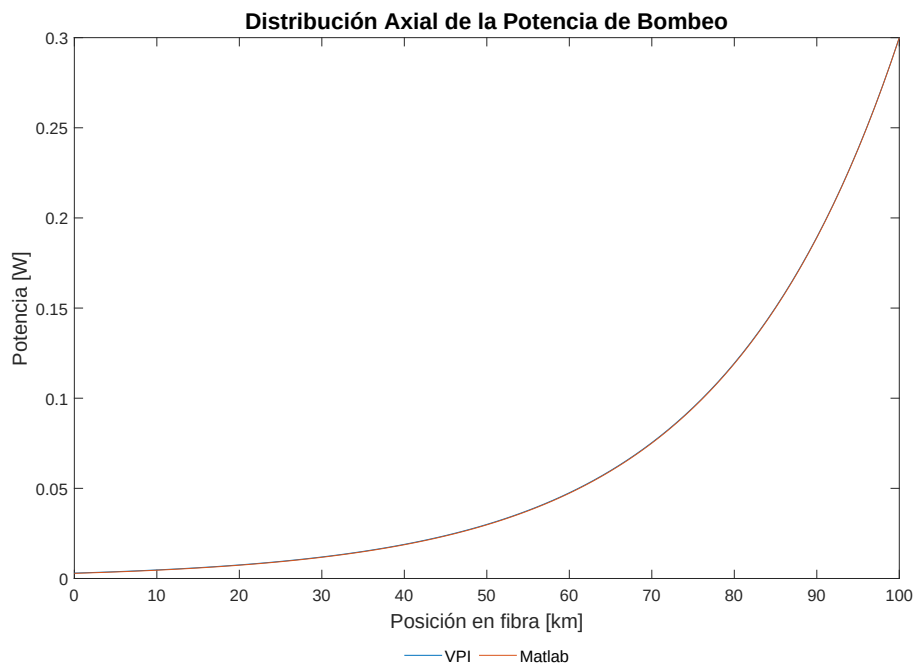


Figura 3.35: Distribución longitudinal de la potencia de bombeo.

La distribución espectral de la ganancia On-Off de los 100 canales equiespaciados se muestra en la Figura 3.37. En la Figura es posible apreciar una diferencia en la “forma” de la distribución, esto se debe a que no fue posible obtener el archivo de ganancia Raman exacto utilizado por el software para el ejemplo, por lo que se utilizó un archivo con una forma similar, que también se

obtuvo del software. El archivo utilizado se llama *RamanGainEfficiency_SMF28.dat*, y se muestra en la Figura 3.36

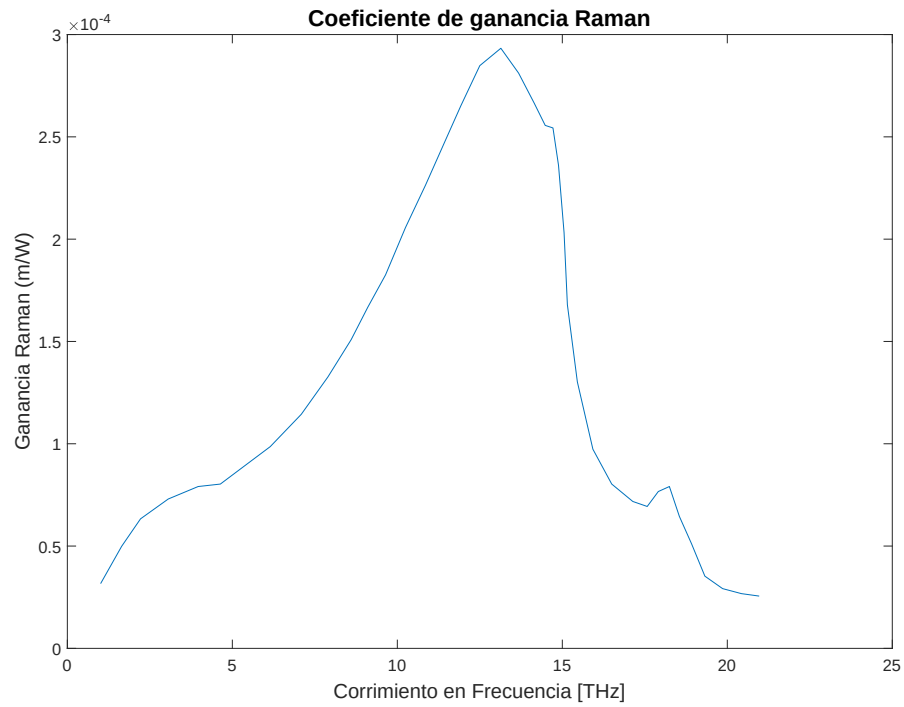


Figura 3.36: Coeficiente de ganancia Raman utilizado.

La Figura muestra también las diferencias de entra ambas ganancias obtenidas, esta se cuantifica en el eje del extremo derecho.

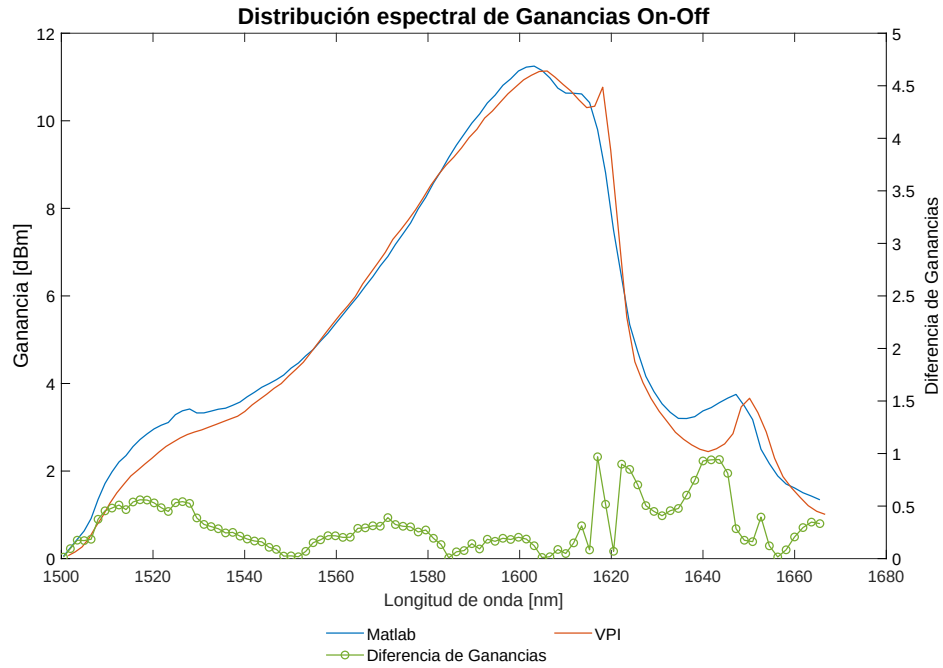


Figura 3.37: Comparación de Ganancias On-Off.

La Figura 3.38 muestra las distribuciones longitudinales de las potencias de señales de algunos canales para la simulación en Matlab y VPIphotonics, en la que se puede observar un comportamiento casi idéntico en ambas simulaciones. En esta figura la ganancia se presenta en forma de una curva creciente hacia el final de la fibra, ya que la ganancia mostrada anteriormente es la ganancia on-off, es decir, ganancia respecto a la misma señal sin ser sometida a al proceso de amplificación Raman.

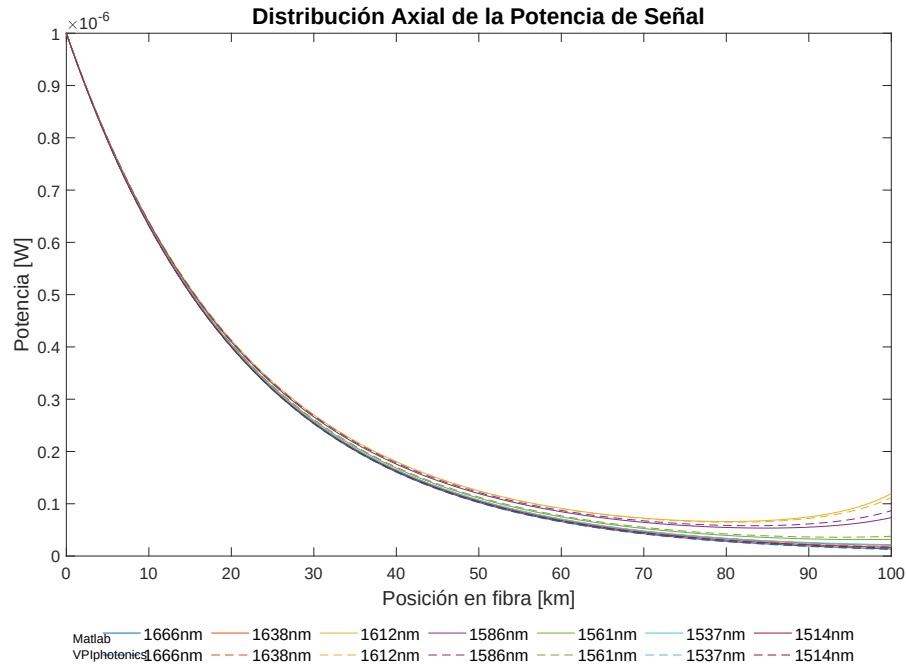


Figura 3.38: Distribución longitudinal de la potencia de señal.

Finalmente, se analiza el ruido ASE generado y amplificado a lo largo de la fibra. La Figura 3.39 muestra la distribución longitudinal de la propagación del ruido ASE para el canal de 1666 nm.

Con esta distribución de potencia del ruido ASE, se calcula la OSNR en cada punto de la fibra y se muestra en la figura 3.40. Como es de esperarse y tal como se demuestra en [30], para un caso con bombeo Backward la OSNR se degrada en gran medida hacia el final de la fibra, cuando la potencia de bombeo tiene mayor amplitud.

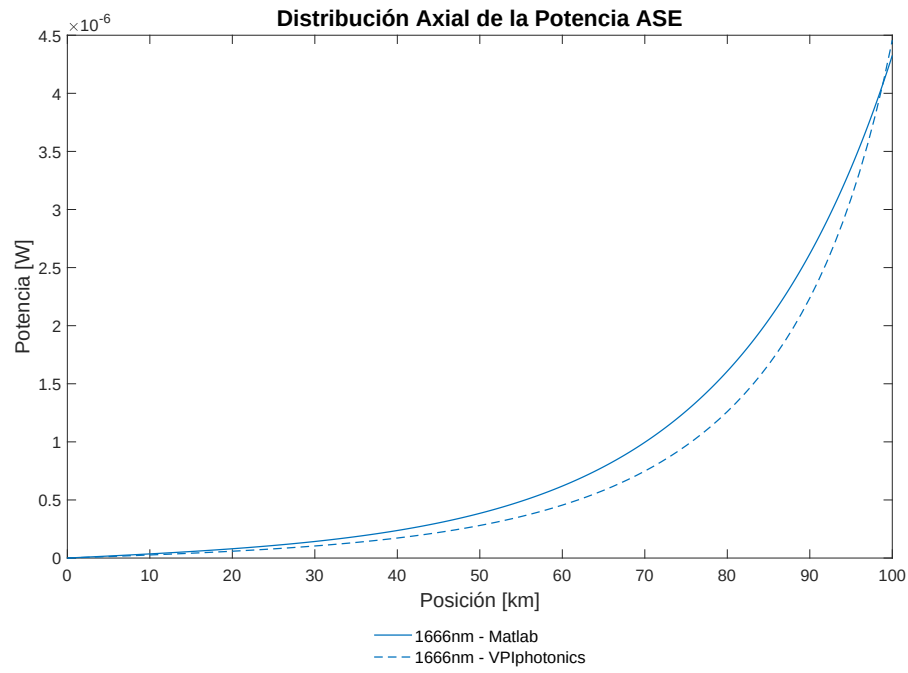


Figura 3.39: Distribución longitudinal de la potencia de ruido ASE.

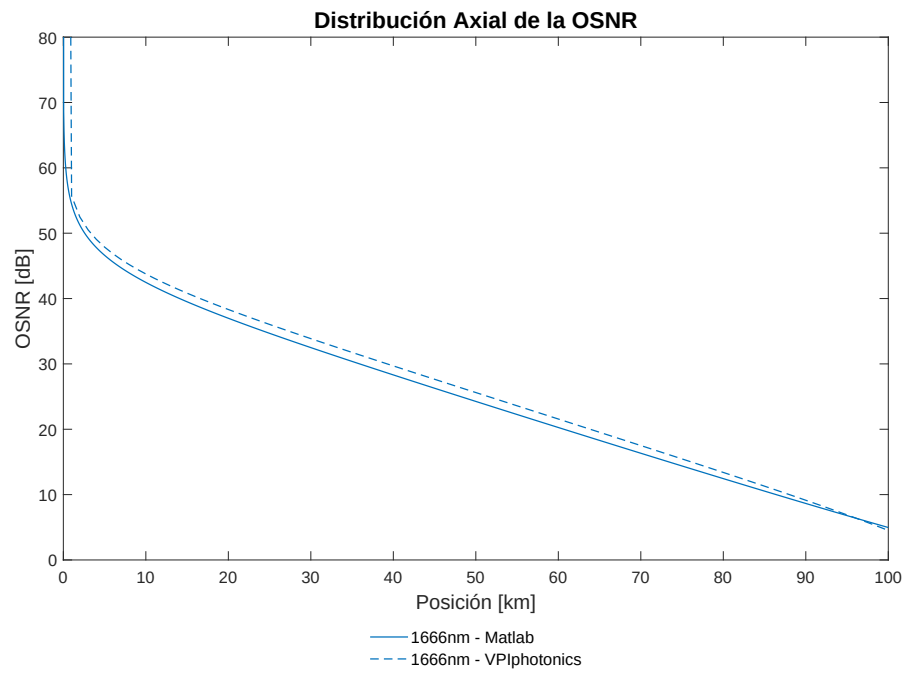


Figura 3.40: Distribución longitudinal de la OSNR.

3.3.2 Segundo caso: Bombeo Bidireccional

Como segundo caso de validación, se toman los mismos 100 canales de señal pero esta vez amplificados por bombeo bidireccional, en una fibra de 50 km y con coeficiente de atenuación mayor. Los parámetros de la fibra utilizada se detallan en la Tabla 3.10, mientras que los parámetros de los haces enviados se detallan en la Tabla 3.11. Además la Figura 3.41 muestra un esquema de la configuración utilizada.

<i>Parámetros de entrada al simulador</i>	<i>Valores utilizados</i>
Parámetros de la fibra	
Largo de la fibra Raman	50 km
Radio de la fibra Raman	5.04626 μm
Coeficiente de atenuación	0.25 dB/km
Índice refracción del núcleo (n_1)	1.47
Índice de refracción del revestimiento (n_2)	1.42
Potencia de ruido ASE a la entrada	-200 dBm

Tabla 3.10: Parámetros de la fibra Raman.

<i>Parámetros de entrada al simulador</i>	<i>Valores utilizados</i>	
	Haces de señal	Haces de bombeo
Número de canales	100	2
Longitudes de onda	[1500 , 1655] nm	1500 nm
Modos espaciales	LP01	LP01
Potencia de entrada	-30 dBm	200 mW
Dirección	Forward	Forward + Backward

Tabla 3.11: Parámetros de las señales de Entrada

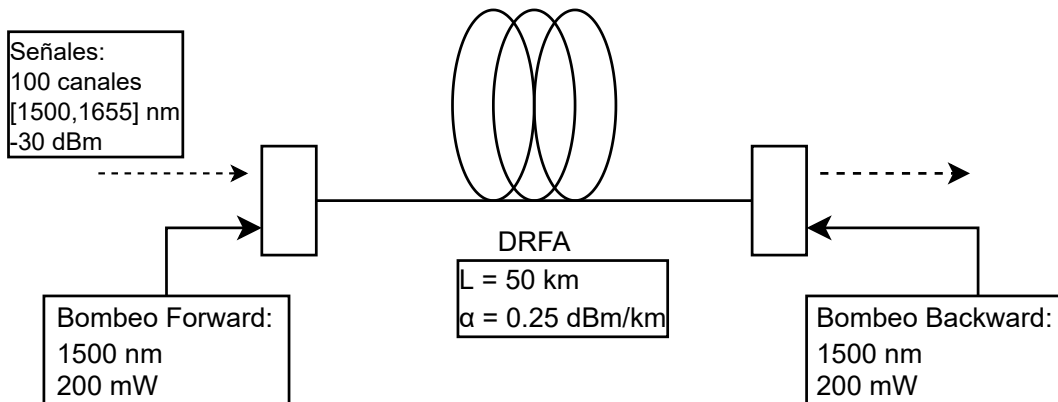


Figura 3.41: Esquema del caso 2 de la validación del amplificador Raman

En esta configuración, se obtiene la distribución mostrada en la Figura 3.43 para la potencia de

bombeo a lo largo de la fibra la cual como es de esperar, tiene un comportamiento decreciente en su dirección de propagación.

La distribución espectral de la ganancia On-Off de los 100 canales equiespaciados se muestra en la Figura 3.44. Tal como para el caso anterior, es posible apreciar una diferencia en la “forma” de la distribución, lo que ocurre por la misma razón antes mencionada: VPIphotonics tampoco entrega directamente el coeficiente Raman utilizado, por lo que, dentro de los archivos entregados por el Software, se encuentra una mejor concordancia con coeficiente de ganancia Raman mostrado en la Figura 3.42.

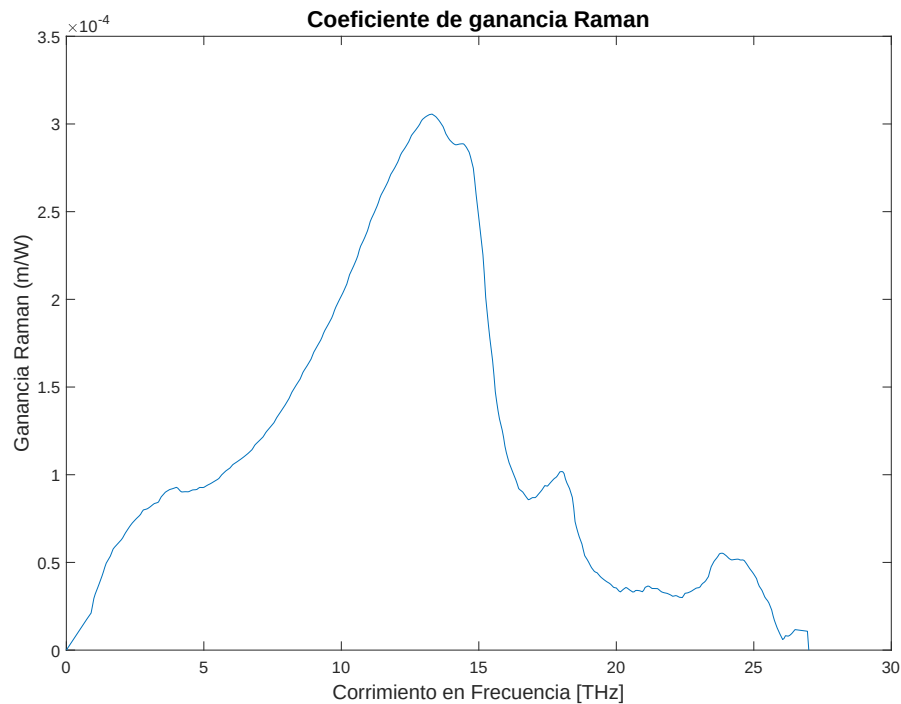


Figura 3.42: Coeficiente de ganancia Raman utilizado.

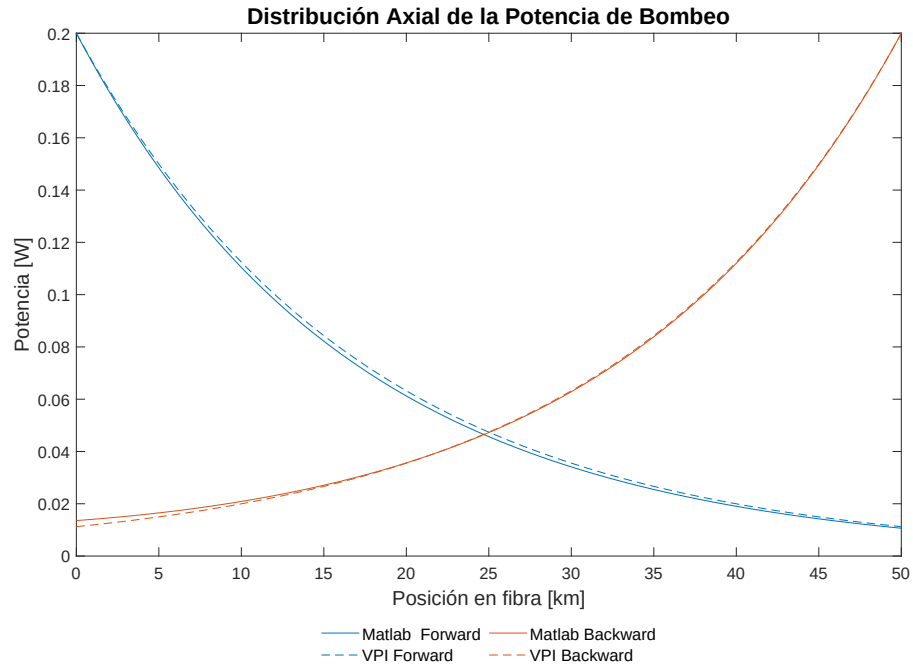


Figura 3.43: Distribución longitudinal de la potencia de bombeo.

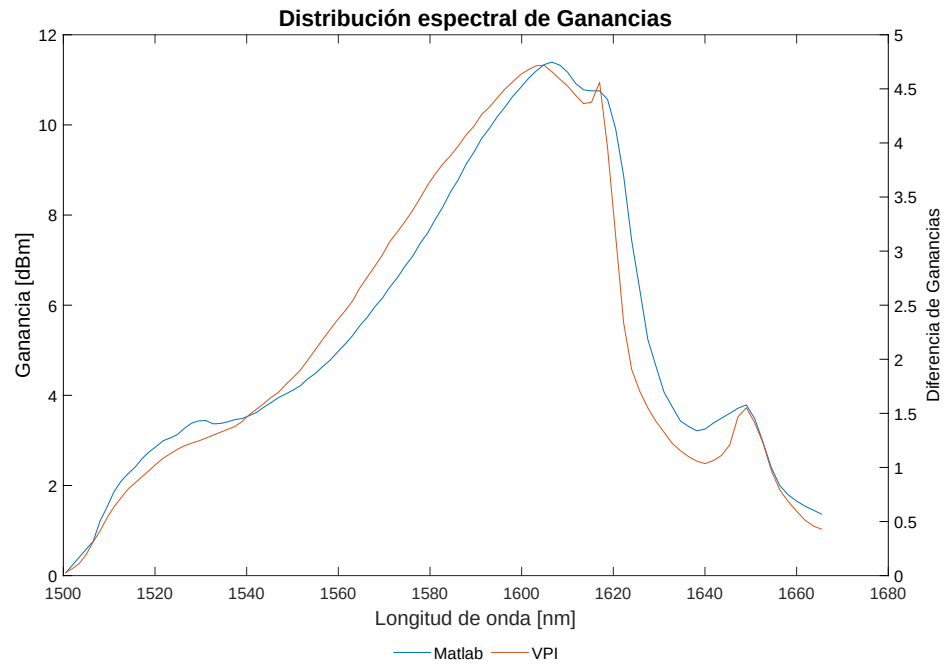


Figura 3.44: Comparación de ganancias On-Off.

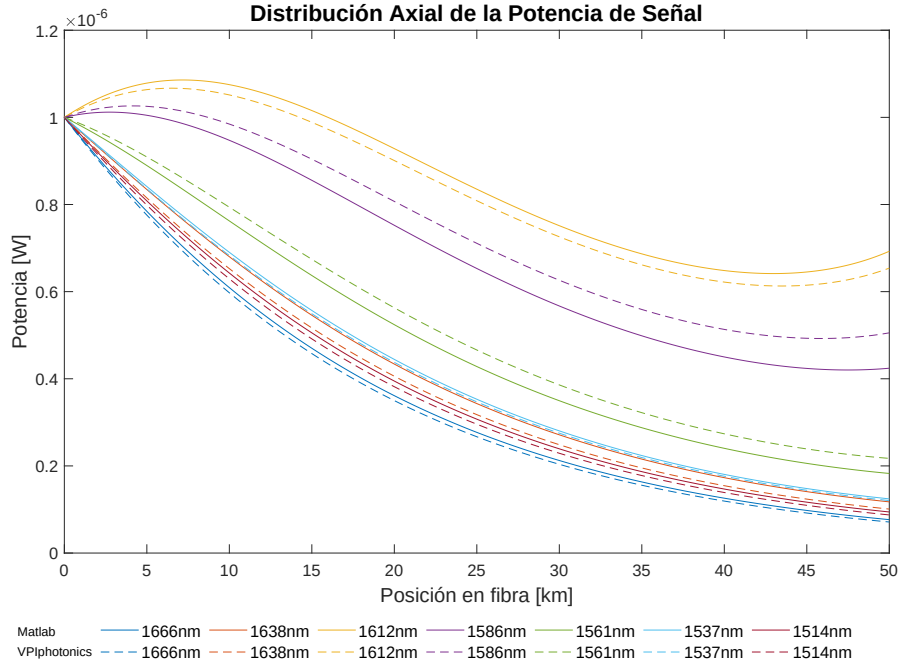


Figura 3.45: Distribución longitudinal de la potencia de señal.

La Figura 3.45 muestra la comparación entre las distribuciones longitudinales de las potencias de señales de algunos canales, en la que se puede observar un comportamiento muy similar en ambas simulaciones, a pesar existir una mayor diferencia en algunos canales, la cual se adjudica a la diferencia entre coeficientes de ganancia Raman utilizados para las simulaciones. Esta Figura demuestra como algunos canales si presentan una amplificación notoria, tanto al inicio como al final de la fibra, especialmente los canales centrales, como lo son los de longitudes de onda 1612 nm y 1586 nm, que están más cercanos al peak de ganancia Raman dado su corrimiento de frecuencia respecto a la frecuencia de bombeo.

Posteriormente, se comparan los resultados obtenidos de ambos simuladores para el ruido ASE generado y amplificado en la fibra. Para esto, la Figura 3.46 muestra la distribución longitudinal de la potencia de ruido ASE de algunos canales.

De la potencia de ruido ASE, se calcula la OSNR, la cual se muestra distribuida longitudinalmente a lo largo de la fibra en la Figura 3.47.

Para finalizar el análisis del ruido, se muestra la distribución espectral de la figura de ruido del amplificador obtenida mediante las simulaciones de VPIphotonics y Matlab en la Figura 3.48.

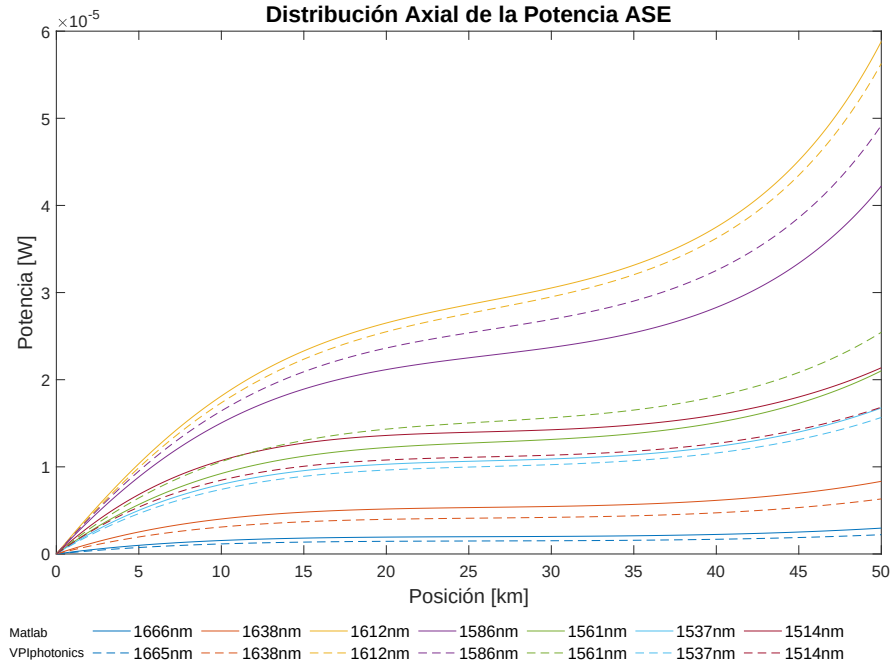


Figura 3.46: Distribución longitudinal de la potencia de ruido ASE.

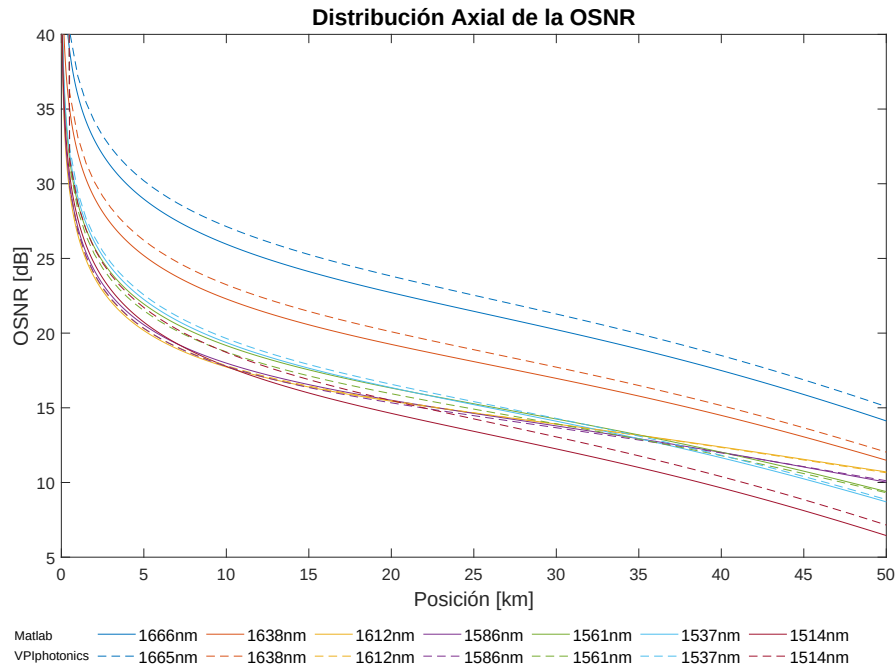


Figura 3.47: Distribución longitudinal de la OSNR.

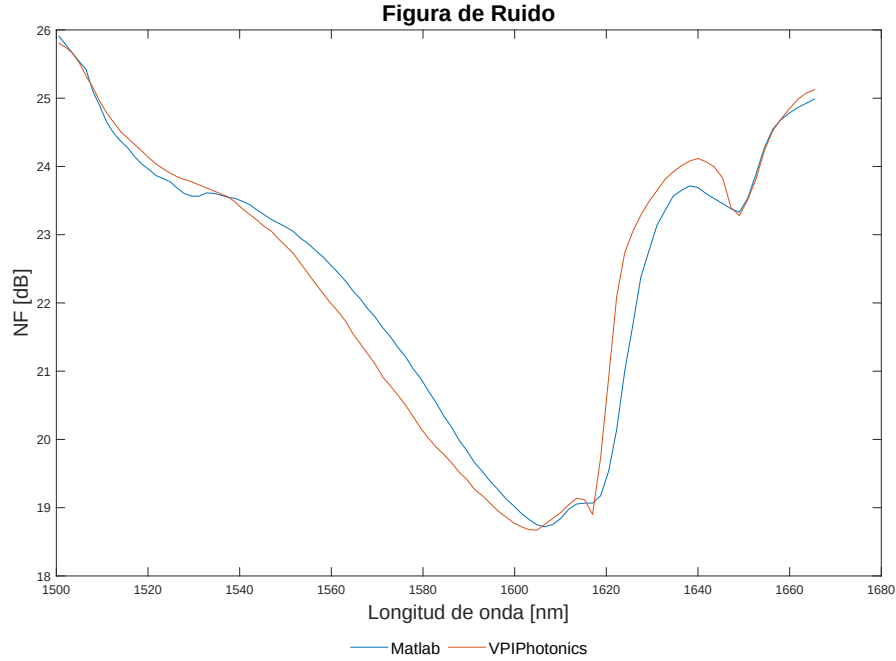


Figura 3.48: Distribución espectral de la figura de ruido

Es posible notar, tanto en las figuras correspondientes a los haces de señales como en las figuras referidas al ruido ASE, que, a pesar de las diferencias en magnitud adjudicadas al espectro de ganancia Raman, los comportamientos de cada frecuencia siguen el mismo patrón, es decir, en ambas simulaciones son los mismos canales de frecuencias los que presentan una notoria amplificación y se comportan de manera muy similar en su distribución longitudinal dentro del amplificador.

3.4 Conclusión

Este capítulo se ha enfocado en la caracterización y validación de los modelos matemáticos de amplificadores ópticos EDFA y DFRA mediante simulación numérica. Se han presentado los métodos de validación utilizados para ambos amplificadores ópticos, mostrando los resultados obtenidos en cuanto a la evolución de las potencias de las señales presentes, la ganancia final para el EDFA y la ganancia on-off para el amplificador Raman, y se ha incluido los resultados sobre la generación y amplificación de ruido ASE y la figura de ruido de los amplificadores.

Los resultados obtenidos mediante el simulador desarrollado en esta tesis se han comparado con los obtenidos mediante el software comercial VPIphotonics, mostrando una buena concordancia entre ambos. En el caso del EDFA, se ha podido validar tanto el modelo monomodo como el multimodo, mientras que en el caso del DRFA, debido a las limitaciones del software comercial,

sólo se ha podido validar el modelo monomodo.

En el caso del EDfA, una vez se tuvo el amplificador debidamente caracterizado, se desarrolló un filtro intermedio de ecualización para la ganancia a la salida. El diseño del filtro se basó en el sistema "Two-stage EDFA with Midstage GEF" utilizado por VPIphotonics. El filtro logró reducir el ripple del espectro de ganancia a menos de 0.2 dBm para el modo LP01 y un comportamiento prácticamente idéntico para el modo LP11a. Este filtro es relevante para mejorar la eficiencia y confiabilidad de los sistemas de comunicaciones ópticas.

Finalmente, al final de la sección correspondiente a cada uno de los amplificadores, se presentaron los resultados frente a un ajuste realizado a los casos tomados directamente del software VPIphotonics, que se escogieron como referencia verídica al ser parte del software, a modo de mostrar el comportamiento de los amplificadores en casos similares, pero utilizando parámetros más comunes en un entorno de trabajo real.

Capítulo 4

Estudio de Casos

En este capítulo se presentan los análisis realizados a tres casos de interés planteados utilizando como herramienta los módulos de simuladores de amplificadores ópticos realizados en este trabajo de titulación. Ambos casos de estudio referentes al EDFA utilizan los resultados obtenidos en la sección de caracterización del mismo, incluyendo el filtro ecualizador allí desarrollado.

4.1 Amplificadores EDFA en Cascada

Como primer caso de interés a analizar, se presenta una configuración en cascada de 4 amplificadores ópticos EDFA, separados entre sí por un tramo de fibra óptica de 90 km de largo. La configuración simulada se muestra en mayor detalle en la Figura 4.1.

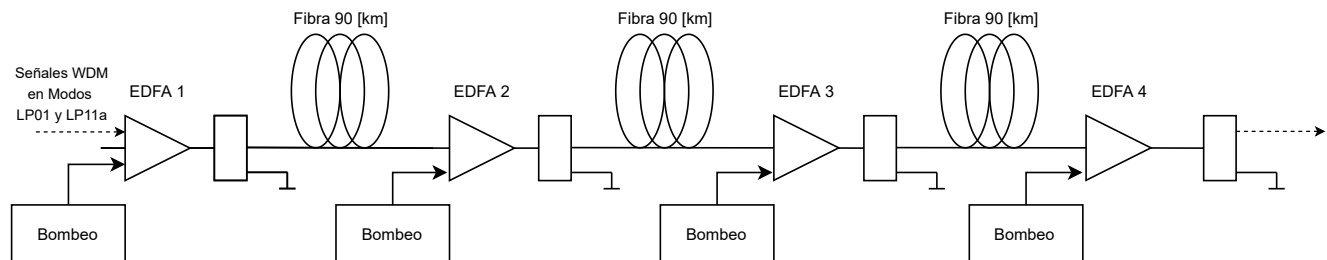


Figura 4.1: Configuración simulada de EDFAs en cascada.

Los tramos de transmisión en fibra óptica fueron simulados únicamente como pérdidas por atenuación, sin incluir más fenómenos. Se utilizó una distribución dependiente de la longitud de onda para el coeficiente de atenuación de la fibra, obtenido del software VPIphotonics, el cual se muestra en la Figura 4.2.

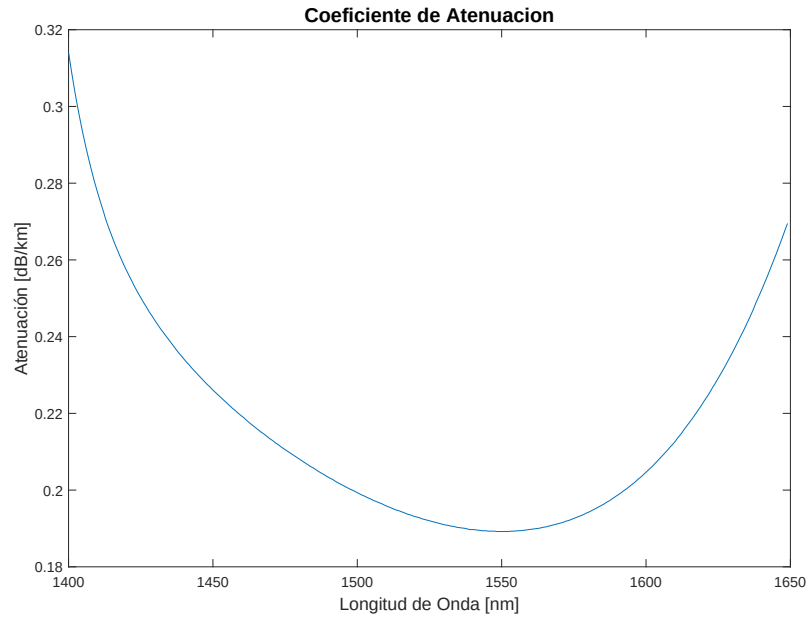


Figura 4.2: Coeficiente de atenuación respecto a longitud de onda

Los amplificadores se configuraron iguales entre sí, sus parámetros se detallan en la Tabla 4.1, mientras que las haces de señal y bombeo se detallan en la Tabla 4.2. Los parámetros fueron seleccionados según los resultados obtenidos en la caracterización de tal forma que aproveche la potencia de bombeo y se logre compensar las pérdidas de los 90 km de fibra, en una ventana de canales al rededor de los 1555 nm de longitud de onda, en la cual la atenuación de la fibra es de aproximadamente 0.2 dB/km.

<i>Parámetros de entrada al Simulador</i>	<i>Valores utilizados</i>
Parámetros del EDFA	
Largo del EDFA	5 [m]
Radio del EDFA	5 μm
Densidad de iones de Erbio	7×10^{24} [iones/m ³]
Índice refracción del núcleo (n_1)	1.45
Índice de refracción del revestimiento (n_2)	1.4354
Apertura numérica	0.2051
Potencia de ruido ASE a la entrada	-58 dBm

Tabla 4.1: Parámetros de fibra de los EDFA

<i>Parámetros de entrada al simulador</i>	<i>Valores utilizados</i>	
	Haces de señal	Haces de bombeo
Número de canales	31	1
Longitudes de onda	[1530 , 1560] nm	980 nm
Modos espaciales	LP01 , LP11a	LP01
Potencia de entrada	-20 dBm	100 mW

Tabla 4.2: Parámetros de las señales de entrada

A partir de estos parámetros de entrada, las ganancias a la salida de cada uno de los 4 amplificadores se muestran en las figuras 4.3 y 4.4, para los modos LP01 y LP11a, respectivamente. Se observa un nivel medio de ganancia ligeramente superior para el modo LP01, tal como es esperado, además el espectro de salida es casi totalmente plano, esto es por acción del filtro de ecualización de cada amplificador.

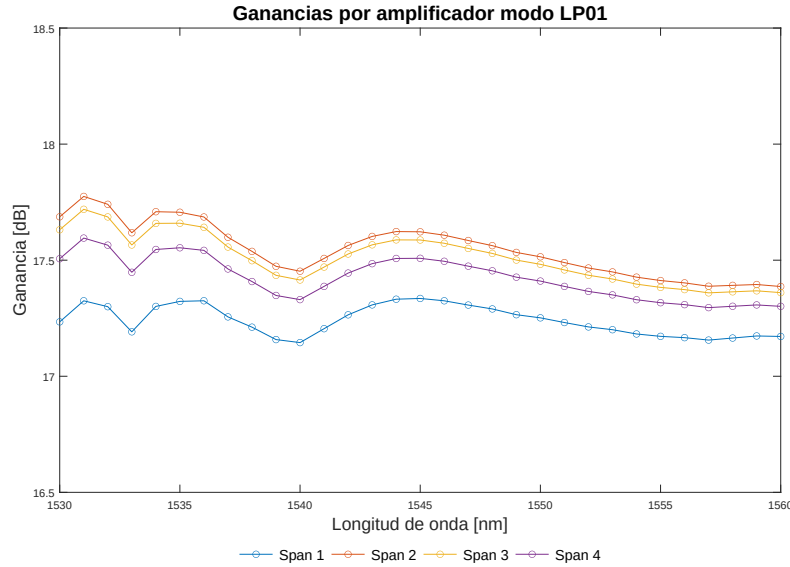


Figura 4.3: Ganancia de potencia a la salida de cada uno de los EDFAS en la cascada, para el modo LP01

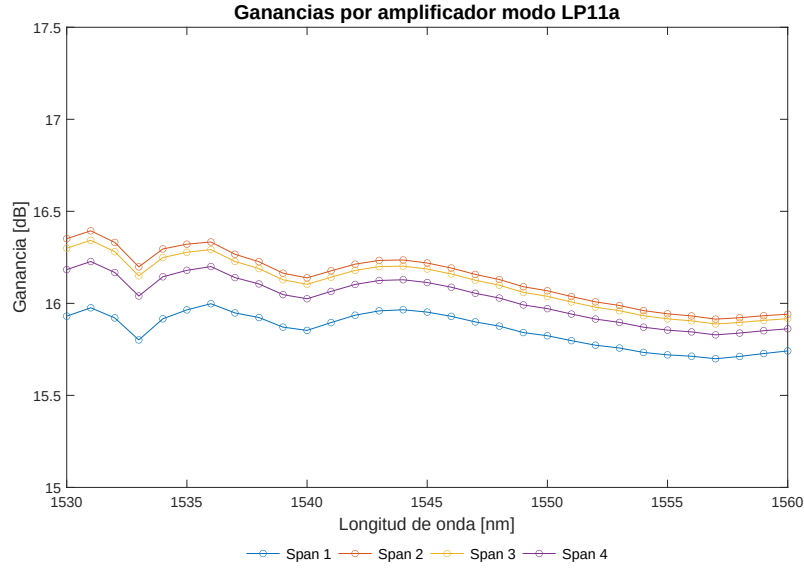


Figura 4.4: Ganancia de potencia a la salida de cada uno de los EDFAS en la cascada, para el modo LP11a

La potencia a lo largo de todo el sistema para el canal de 1555 nm en los dos modos ópticos se muestra en la Figura 4.5. La figura utiliza escalas de distancias diferenciadas para las secciones de transmisión y amplificación debido a su gran diferencia de órdenes de magnitud.

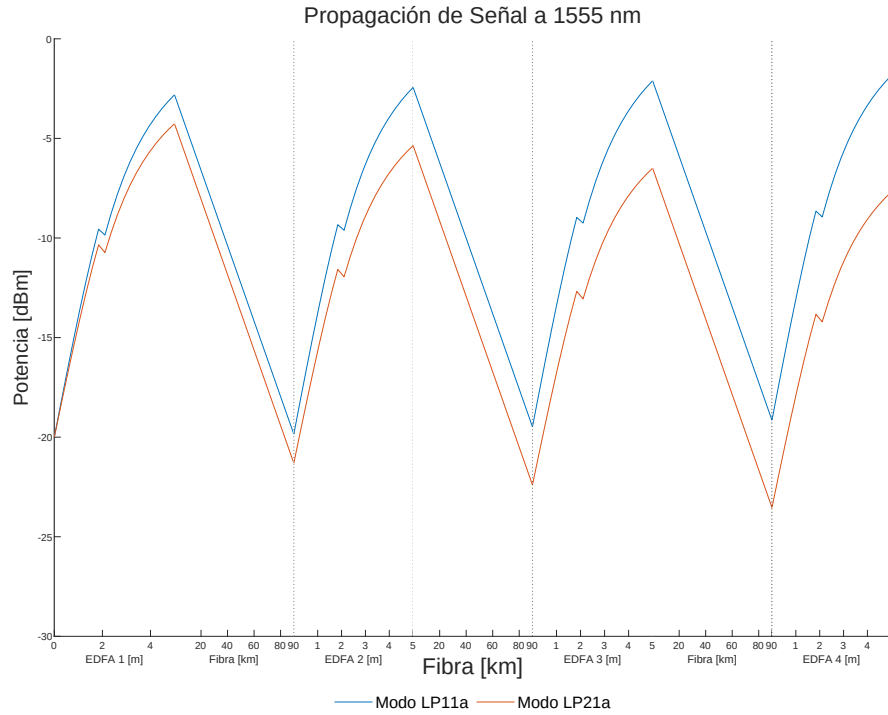


Figura 4.5: Potencia de señal a lo largo de todo el sistema para el canal de longitud de onda 1555 nm

A modo de extender los resultados mostrados de la Figura anterior, las figuras 4.6 y 4.7 muestran la distribución espectral de las potencias a la salida de cada amplificador en los modos ópticos propagados. En estas figuras queda claro cómo los efectos no lineales del EDFA causan que, a partir del ripple o no uniformidad de la ganancia, se acentúa de amplificador en amplificador, este efecto se conoce como *gain peaking*. Esto ocurre ya que estos canales con mayor ganancia tienen una potencia de entrada cada vez mayor en los siguientes amplificadores, aumentando la probabilidad de que los fotones emitidos por los iones de Erblio sean coherentes con estos, lo que a su vez causa que se reduzca la ganancia de los canales con potencias de entrada menor.

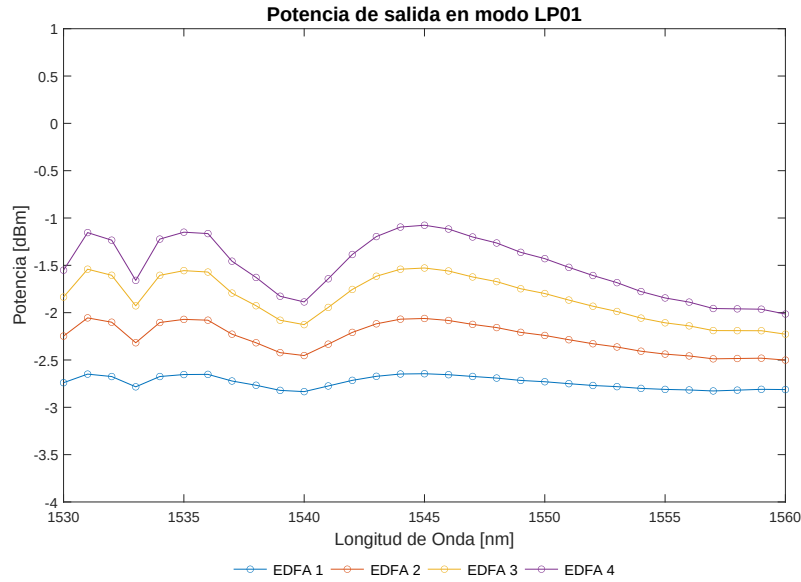


Figura 4.6: Distribución espectral de las potencias de salida de cada EDFA para el modo LP01

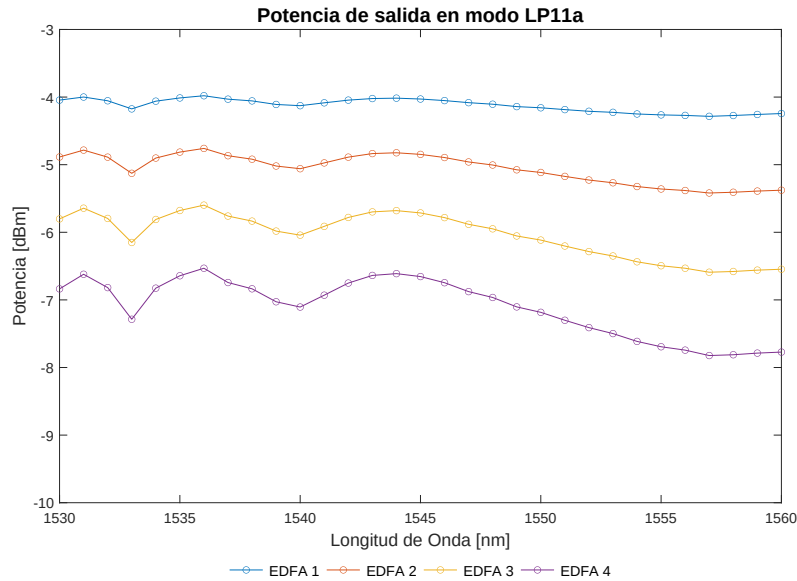


Figura 4.7: Distribución espectral de las potencias de salida de cada EDFA para el modo LP11a

Estas figuras muestran un comportamiento inverso entre ambos modos, donde el modo LP01 va ganando potencia, poco a poco, a la salida de cada amplificador, mientras que el modo LP11a tiene cada vez una menor potencia de salida. Esto se debe a que el modo LP11a no queda del todo compensado por el amplificador. Esta diferencia se debe a que el acoplamiento entre el modo

LP01 de bombeo es mayor con el modo LP01 que con el modo LP11a de señal.

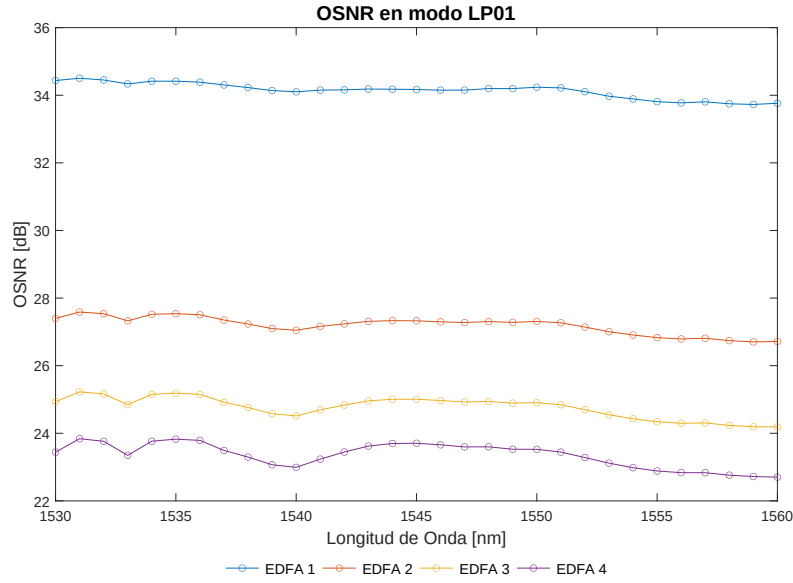


Figura 4.8: Relación señal a ruido óptica a la salida de cada amplificador para el modo LP01

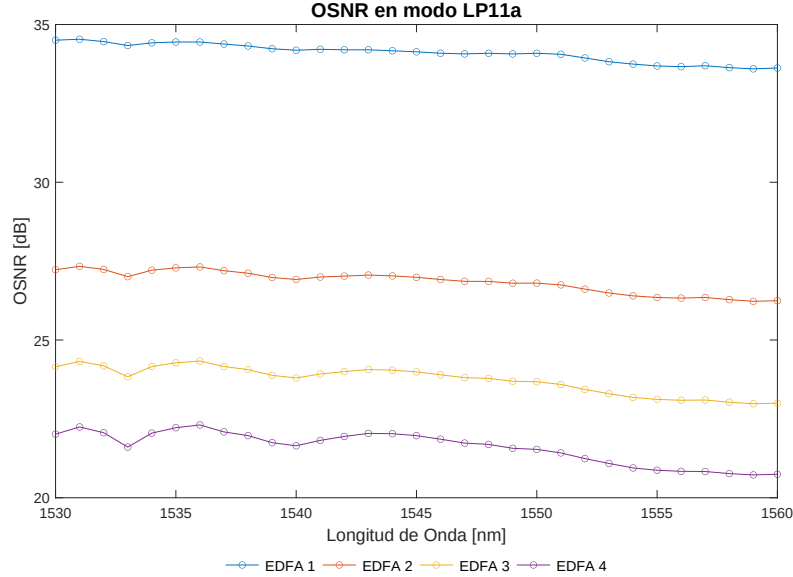


Figura 4.9: Relación señal a ruido óptica a la salida de cada amplificador para el modo LP11a

Para analizar el efecto del ruido generado en los amplificadores, se presentan las figuras 4.8 y 4.9 que muestran la OSNR a la salida de cada amplificador. Como es de esperar, la relación señal

a ruido se va degradando en cada uno de los amplificadores de la cascada, esta comienza en 33.81 y 33.68 dB para los 1555 nm, en los modos LP01 y LP11a, respectivamente, a la salida del primer amplificador y baja hasta los 22.88 y 20.87 dB, a la salida del cuarto EDFA. Se observa además que, gracias al filtro ecualizador, la relación señal a ruido posee un espectro bastante plano, tal como se obtuvo para la ganancia.

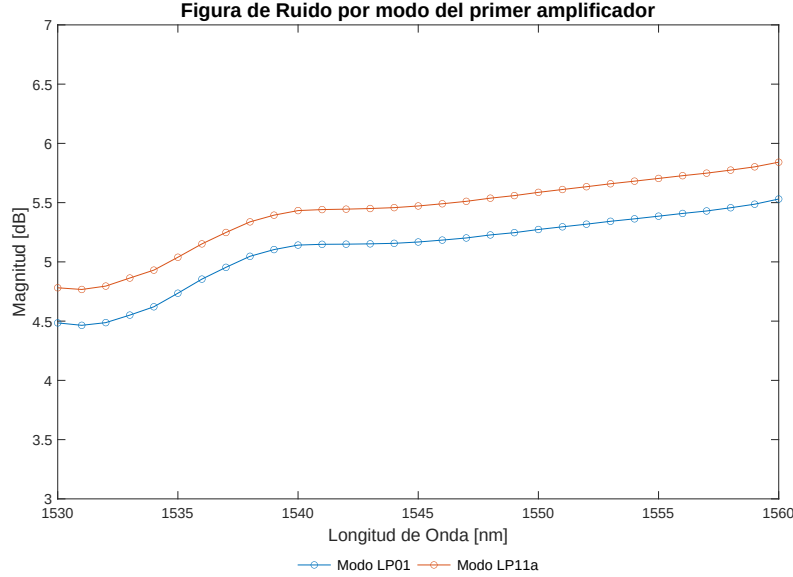


Figura 4.10: Figura de ruido del primer Span para los modos LP01 y LP11a

Finalmente, las figuras de ruido de los dos modos bombeados en el primer amplificador de la cascada se presentan en la Figura 4.10. Tal como ha ocurrido anteriormente, la figura de ruido es ligeramente mayor en el modo LP11a, por lo que este modo se degrada más que el modo LP01. A la salida del primer amplificador, ambos modos presentan una figura de ruido entre 4 y 6 dB, según la longitud de onda analizada.

4.2 EDFA con bombeo Backward

Como segundo caso de interés, se analiza los efectos de un bombeo contra-propagante respecto a los haces de señal. Para esta configuración es de especial interés el poder analizar y comparar la figura de ruido respecto a un bombeo co-propagante.

Para esta comparación entre ambas configuraciones de bombeo, se utilizaron los parámetros de fibra mostrados en la Tabla 4.3 y de haces ópticos mostrados en la Tabla 4.4.

<i>Parámetros de entrada al simulador</i>	<i>Valores utilizados</i>
Parámetros del EDFA	
Largo	5 [m]
Radio	5 μm
Cantidad de iones de Erblio	7 $\times 10^{24}$
Índice refracción del núcleo (n_1)	1.45
Índice de refracción del revestimiento (n_2)	1.4354
Apertura numérica	0.2051
Potencia de ruido ASE a la entrada	-58 dBm

Tabla 4.3: Parámetros de fibra en EDFA

<i>Parámetros de entrada al simulador</i>	<i>Valores utilizados</i>	
	Haces de Señal	Haces de Bombeo
Número de canales	31	1
Longitudes de onda	[1530 , 1560] nm	980 nm
Modos espaciales	LP01 , LP11a	LP01
Potencia de entrada	0 dBm	100 mW

Tabla 4.4: Parámetros de las señales de entrada

Como se detalla en la Tabla 4.4, se utilizó un bombeo de 100 mW en el modo LP01, de acuerdo con los resultados obtenidos durante la caracterización del amplificador para lograr una óptima amplificación en una ventana del espectro al rededor de los 1555 nm. La distribución longitudinal de este haz a lo largo del EDFA se muestra en la Figura 4.11 para ambos amplificadores, con las configuraciones co-propagante (*Forward*) y contra-propagante (*Backward*).

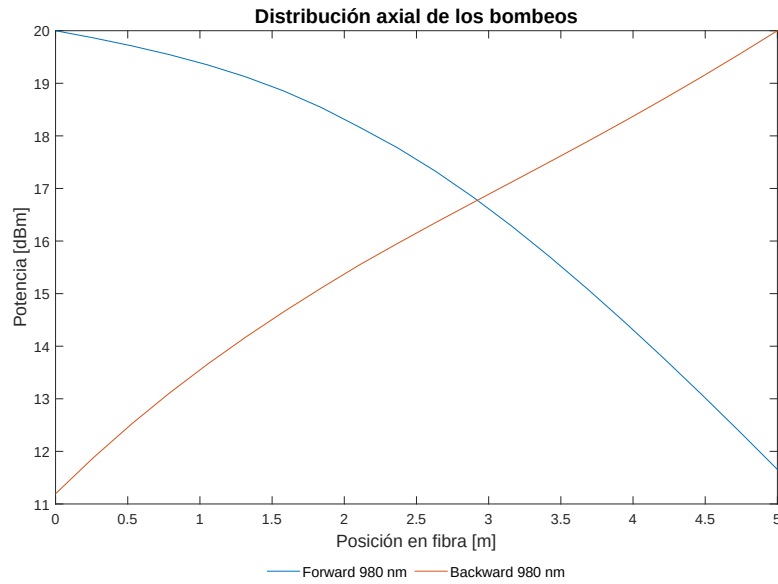


Figura 4.11: Distribución longitudinal de la potencia de bombeo para las configuraciones Forward y Backward

Estas potencias generaron los espectros de ganancia que se observan en la Figura 4.12 para los modos de señal LP01 y LP11a.

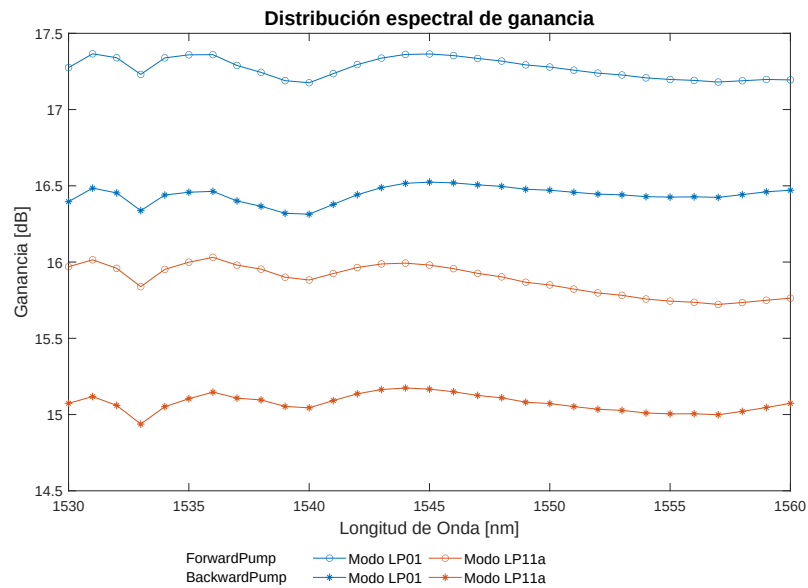


Figura 4.12: Espectro de ganancias de los modos LP01 y LP11a

Es posible apreciar que las ganancias son ligeramente mayores, para ambos modos simulados,

en la configuración *Forward*. Además, se observa que en ambas configuraciones las ganancias del modo LP01 son mayores a las del modo LP11a. Esto es lo esperado al ser utilizado el modo LP01 como bombeo.

Posteriormente, con el fin de observar en mayor detalle el comportamiento de las potencias a lo largo del amplificador, se presentan las figuras 4.13 y 4.14 que muestran la evolución de los haces de señal para los modos LP01 y LP11a para los canales en la vecindad de los 1555 nm.

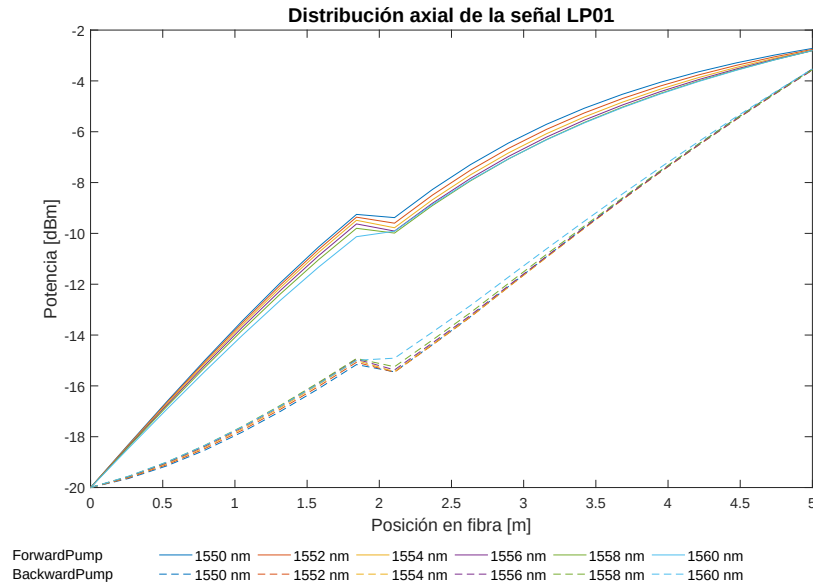


Figura 4.13: Distribución longitudinal de la potencia en el modo LP01

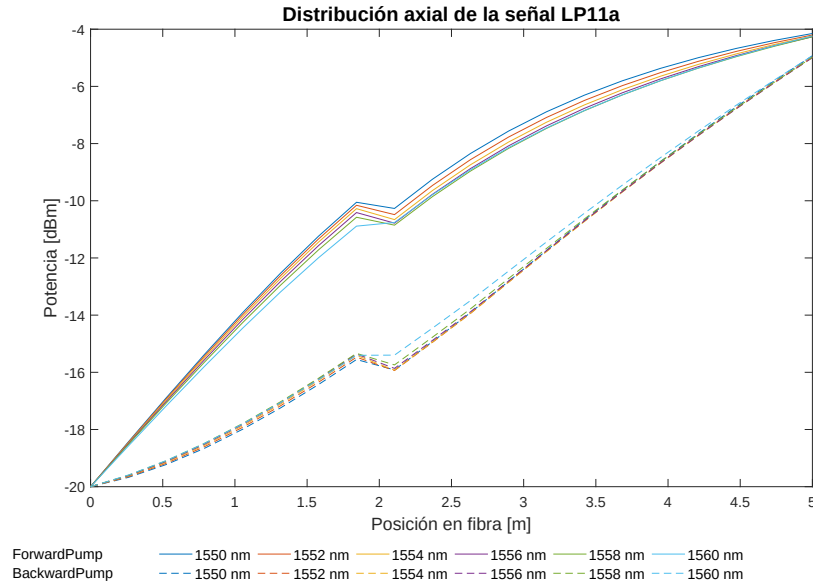


Figura 4.14: Distribución longitudinal de la potencia en el modo LP11a

Cabe destacar que la discontinuidad de la característica creciente esperada para ambos amplificadores, presente al centro de estos, se debe a la presencia del filtro ecualizador.

Como era de esperarse, en el caso de bombeo *Backward*, una gran parte de la amplificación se produce hacia el final del amplificador, contrariamente al caso de bombeo *Forward* donde la amplificación decae hacia el final de la fibra dopada.

Con el fin de estudiar los efectos de generación y amplificación de ruido ASE, se presentan en primer lugar la figura 4.15 en la cual se detalla la relación señal a ruido óptica a la salida de los amplificadores.

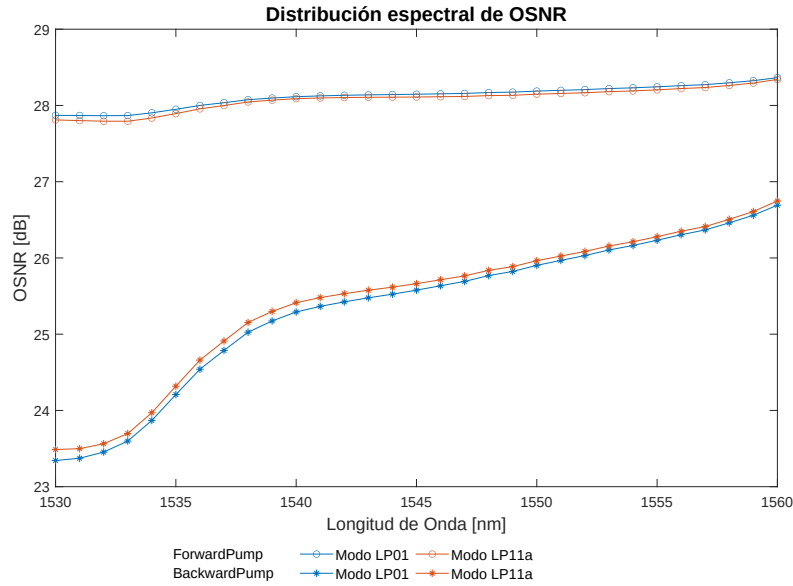


Figura 4.15: Relación señal a ruido óptica a la salida de los amplificadores.

La cual demuestra que el bombeo *Backward* genera una mayor cantidad de ruido ASE, por lo cual degrada más la señal que el bombeo *Forward*.

En segundo lugar, se presenta la comparación de figuras de ruido del amplificador con ambas configuraciones de bombeo en la Figura 4.16, para ambos modos simulados. En la figura se observa que, para ambos modos, se obtiene una mayor figura de ruido al utilizar la configuración de bombeo *Backward*, lo que implica una mayor degradación de la relación señal a ruido.

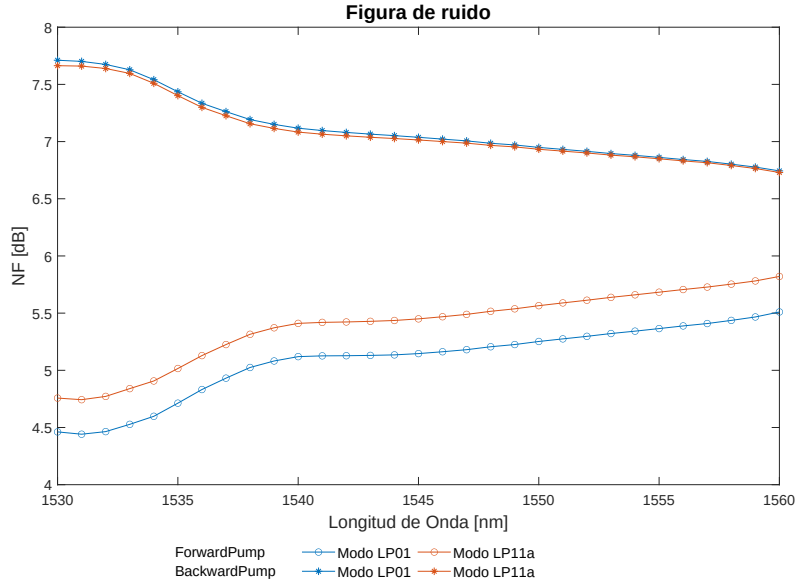


Figura 4.16: Figura de ruido de EDFA en configuraciones Forward y Backward

Estos gráficos demuestran que la figura de ruido es mayor para la configuración de bombeo *backward*, esto se respalda con el análisis de la OSNR que es menor para esta configuración. Por otra parte, las ganancias son muy similares en ambos esquemas de bombeo. Por estas razones, se concluye que el bombeo *Forward* se mantiene como la mejor alternativa para lograr transmisiones a mayores distancias al utilizar un esquema de transmisión de pocos modos.

4.3 Amplificador Raman: Comparación de métodos de bombeos

Como tercer caso de interés, se presenta una comparación de los tres métodos de bombeos para el amplificador óptico Raman distribuido: bombeo Forward, bombeo Backward y bombeo bidireccional. Los parámetros de la fibra utilizados en esta comparación se detallan en la Tabla 4.5, mientras que los parámetros de los haces ópticos se muestran en la Tabla 4.6. Este caso busca hacer una comparación de los comportamientos de las ganancias y las potencias del ruido a la salida del amplificador, analizándose las ventajas y desventajas de cada tipo de bombeo.

<i>Parámetros de entrada al simulador</i>	<i>Valores utilizados</i>
Parámetros de la fibra	
Largo	50 km
Radio	5 μm
Coefficiente de atenuación	0.25 dB/km
Índice refracción del núcleo (n_1)	1.46
Índice de refracción del revestimiento (n_2)	1.44
Potencia de ruido ASE a la entrada	-200 dBm

Tabla 4.5: Parámetros de la fibra Raman.

<i>Parámetros de entrada al simulador</i>	<i>Valores utilizados</i>	
	Haces de señal	Haces de bombeo
Número de canales	100	1
Longitudes de onda	[1500 , 1600] nm	1450 nm
Modos espaciales	LP11a , LP21a	LP01
Potencia de entrada	-30 dBm	200 mW
Dirección	Forward	Forward, Backward, Bidireccional

Tabla 4.6: Parámetros de las señales de entrada.

Con respecto al coeficiente de atenuación de la fibra, se utilizó el mismo perfil utilizado para el primer caso analizado, mostrado en la Figura 4.2. Cabe destacar también que la potencia total de bombeo utilizada para el bombeo bidireccional es de 200 mW, por lo que se propagan haces de 100 mW a cada extremo de la fibra.

Como primera comparación, se presenta las figuras 4.17 y 4.18 que muestran las ganancias on-off para los tres tipos de bombeos, cada uno en los modos LP11a y LP21a, respectivamente. En estas figuras se aprecia que la mayor ganancia se genera por el bombeo backward mientras que la menor ganancia se obtuvo mediante el bombeo forward, con el bombeo bidireccional entre ambos casos.

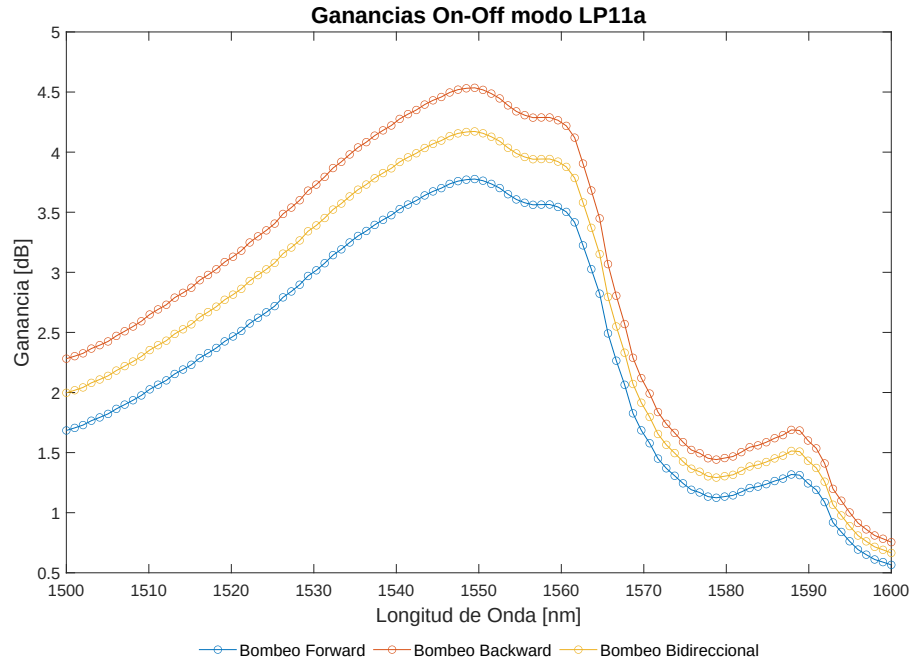


Figura 4.17: Ganancias On-Off para modo LP11a

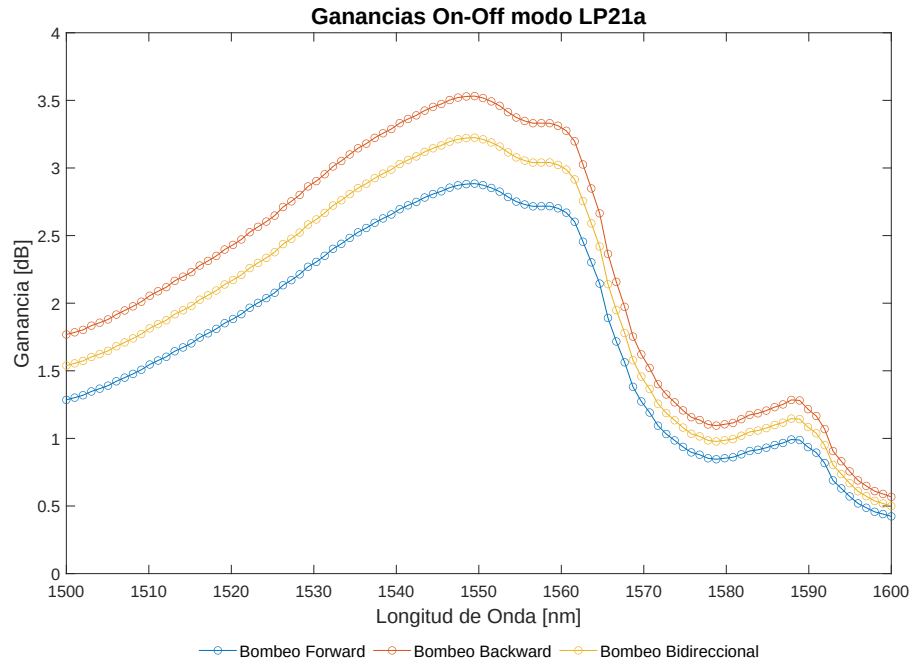


Figura 4.18: Ganancias On-Off para modo LP21a

En segundo lugar se analiza la OSNR a la salida de cada amplificador obtenida para cada tipo bombeo, las cuales se muestran en las figuras 4.19 y 4.20 para los modos LP11a y LP21a respectivamente. De estos gráficos se concluye que el bombeo forward es el que genera menor cantidad de ruido ASE entre los tres tipos de bombeos, ya que, a pesar de generar menor ganancia, tiene la mayor relación señal a ruido óptica. Por contra parte el bombeo backward, que genera la mayor ganancia de los tres, es también el que entrega mayor magnitud de ruido ASE a la salida, quedando con la peor relación señal a ruido entre los tres bombeos.

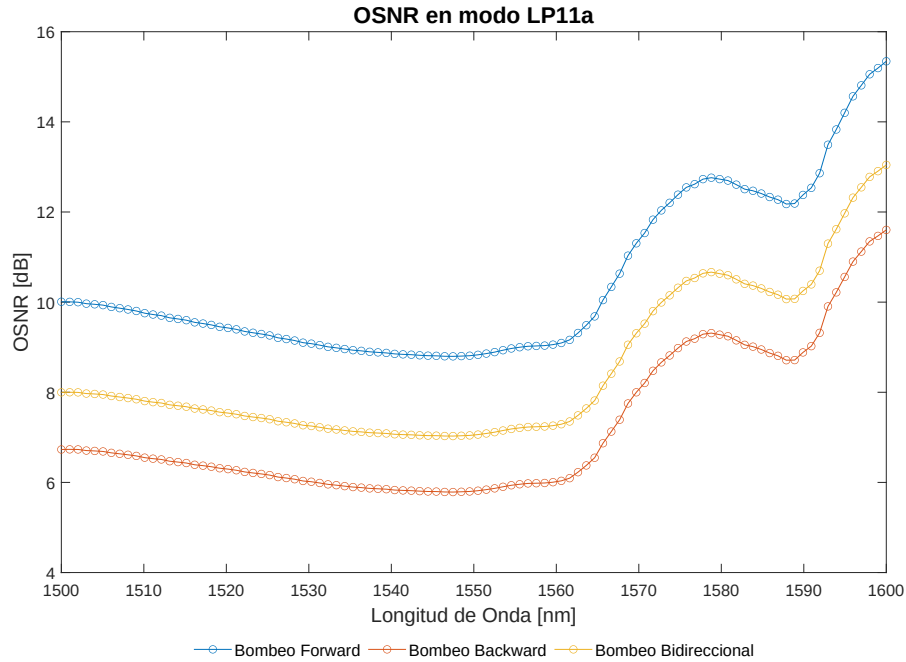


Figura 4.19: OSNR a la salida del amplificador para modo LP11a

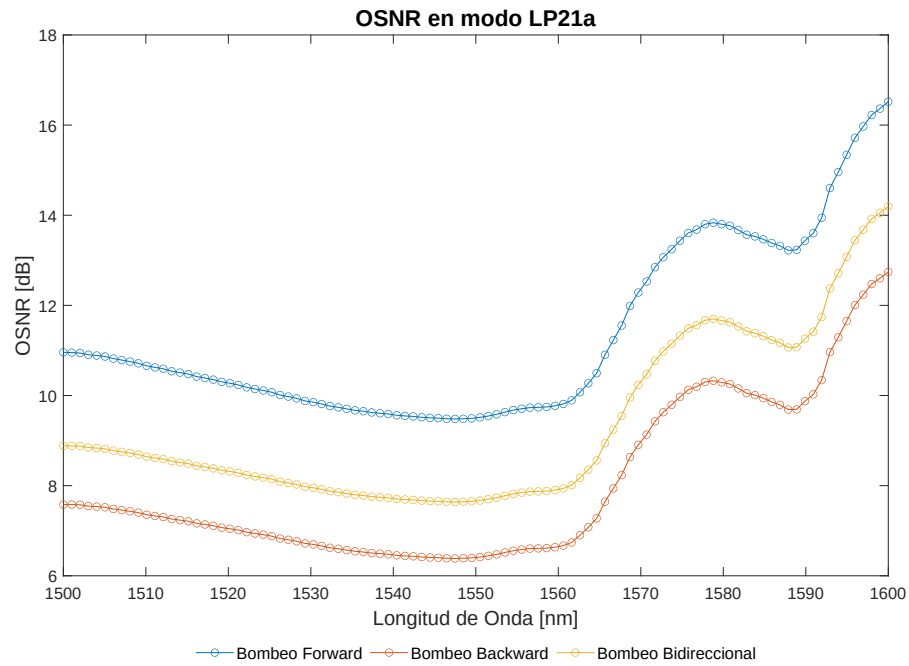


Figura 4.20: OSNR a la salida del amplificador para modo LP21a

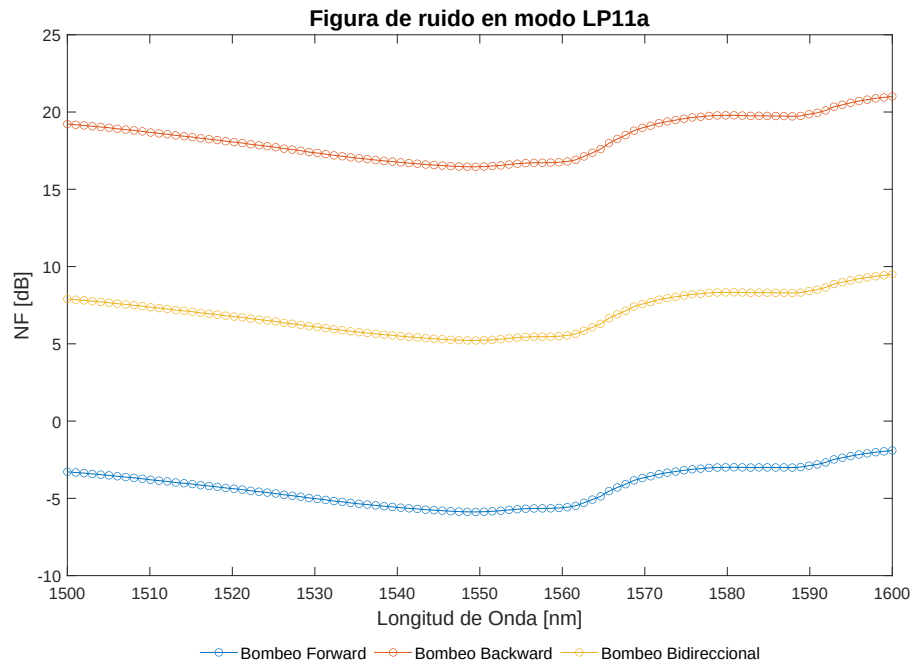


Figura 4.21: Figura de ruido del amplificador para modo LP11a

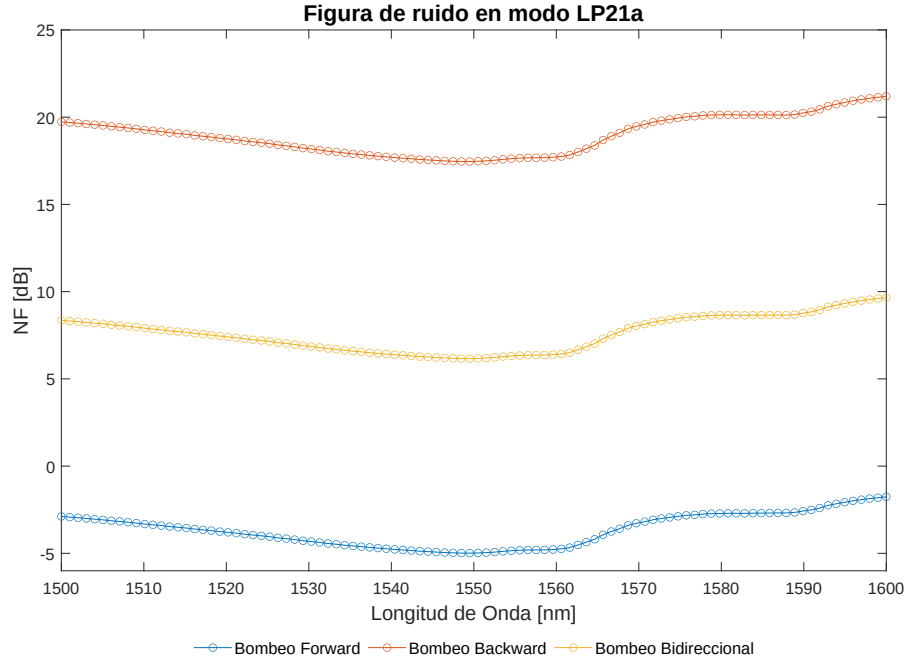


Figura 4.22: Figura de ruido del amplificador para modo LP21a

Finalmente, las figuras 4.21 y 4.22 muestran las figuras de ruido obtenidas por cada tipo de bombeo para los modos LP11a y LP21a respectivamente. Con estos gráficos se comprueba lo dicho anteriormente, mostrando una clara diferencia entre el ruido generado por el bombeo backward respecto a los otros dos tipos de bombeos. Con esto se concluye que los bombeos forward e híbridos presentan un mejor desempeño general, con el primero de estos generando menor ganancia pero una relación señal a ruido superior.

4.4 Conclusión

En el capítulo 4 se presentaron tres casos de estudio que analizaron la eficacia de diferentes configuraciones y métodos de bombeo en amplificadores ópticos. En el primer caso, se estudió una cascada de 4 amplificadores EDFA separados por 90 km de fibra óptica, utilizando el filtro ecualizador desarrollado anteriormente. Los resultados mostraron que, como era de esperar, la relación señal-ruido se degradó en cada uno de los amplificadores de la cascada, además gracias al filtro ecualizador, la ganancia y la relación señal-ruido consiguen un espectro casi plano. En el segundo caso, se analizaron los efectos de un bombeo contra-propagante en comparación con un bombeo co-propagante en un EDFA. Los resultados mostraron que la figura de ruido era mayor en la configuración de bombeo backward mientras que la OSNR era menor. Por lo tanto, se concluyó que el

bombeo Forward es la mejor alternativa para lograr transmisiones a mayores distancias al utilizar un esquema de transmisión de pocos modos. Por último, en el tercer caso se compararon los tres métodos de bombeos en un amplificador Raman distribuido: bombeo Forward, bombeo Backward y bombeo bidireccional. Los resultados mostraron que los bombeos Forward y bidireccional presentaron un mejor desempeño general, con el primero de estos generando menor ganancia, pero una relación señal-ruido superior. Se puede concluir que el uso de un adecuado ajuste a los parámetros del amplificador y método de bombeo es crucial para lograr un alto rendimiento en amplificadores ópticos y transmisiones a mayores distancias.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo se implementaron en computador los modelos matemáticos de los amplificadores ópticos EDFAs y Raman Distribuidos, utilizando multiplexación por división de longitud de onda (WDM) en conjunto a multiplexación por división de Modos (MDM), empleando el lenguaje de programación matemático Matlab.

Los amplificadores se implementaron numéricamente como módulos independientes, lo que permite modificar de forma fácil los parámetros de entrada, tales como las características de la fibra (largo, radio, apertura numérica, etc), los haces de señal y bombeo. Esto, además posibilita conectar módulos entre si, permite implementar cascadas de amplificadores.

El amplificador Raman distribuido, por su parte incorpora el efecto Rayleigh y permite realizar bombeo co-propagante, contra-propagante y bidireccional.

Respecto al EDFA, es posible modificar la cantidad de iones para el dopaje y las curvas de emisión y absorción, además de elegir si se quiere un bombeo co-propagante o contra-propagante. Además, para este módulo, se desarrolló un filtro ecualizador del espectro de ganancia, que permite obtener un espectro de ganancias casi plano a la salida del amplificador, con un ripple inferior a 0.5 dB, para los distintos modos propagados.

Ambos amplificadores ópticos fueron validados mediante comparación de simulaciones con el software comercial VPIphotonics. Para esto se utilizaron esquemas pre configurados entregados por el software y se replicaron sus resultados, utilizando los mismos parámetros en los amplificadores realizados en lenguaje Matlab.

Se desarrolló un enlace de fibra óptica con un esquema de EDFAs en cascada que asegura una compensación de las pérdidas de la fibra, con un óptimo uso de la potencia de bombeo al aprovechar la zona lineal de amplificación, utilizando un modelo simplificado para este tramo.

Respecto a este mismo amplificador se analizó también su rendimiento al ser bombeado en sentido contra-propagante, con lo que se aseguró un mejor desempeño al utilizar bombeo co-propagante en amplificadores de pocos modos.

Como tercer caso de estudio, se compararon los esquemas contra-propagante, co-propagante e híbrido para amplificador Raman distribuido, entre los cuales se recomienda utilizar bombeo contra-propagantes o híbridos ya que entregan un mejor comportamiento en cuanto a relación señal a ruido, que a la vez permite cubrir mayores distancias de transmisión.

Como trabajo futuro, es oportuno ampliar los resultados obtenidos en este trabajo de titulación mediante la implementación de sistemas multi-núcleo, para ambos tipos de amplificadores. De esta manera será posible cuantificar el rendimiento de un sistema con multiplexación espacial completo; es decir, utilizando fibras de pocos modos y multi-núcleo. Se propone, además, complementar el esquema de comunicaciones implementando modelos completos para los tramos de transmisión, con lo que sería posible cuantificar las distancias máximas de transmisión alcanzadas con multiplexación espacial.

Referencias

- [1] A. D. Ellis, N. Mac Suibhne, D. Saad, and D. N. Payne. Communication networks beyond the capacity crunch. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2062):20150191, 2016.
- [2] D.J. Richardson, John Fini, and Lynn Nelson. Space division multiplexing in optical fibres. *Nature Photonics*, 7:354–362, 05 2013.
- [3] Hirotaka Ono. *Optical Amplification Technologies for Space Division Multiplexing*.
- [4] Lei Shen, Lei Zhang, Su Chen, Xueting Sun, Yaping Liu, Jun Wu, and Jie Luo. Design, fabrication and measurement of a novel ultra low loss 6-lp-mode fiber. In *2018 IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC)*, pages 90–93, 2018.
- [5] C. E. Shannon. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3):379–423, 1948.
- [6] Noboru Yoshikane and Takehiro Tsuritani. Recent progress in space-division multiplexing optical network technology. In *2020 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, pages 1–4, 2020.
- [7] Fang, Ming, Borui, Songnian Fu, Shuang, Huifeng, Yu, Weijun, and Deming. Design and optimization of multi-core fibers with low crosstalk and large effective area. *Acta Optica Sinica*, 34:0106005, 01 2014.
- [8] Junwei Zhang, Junyi Liu, Lei Shen, Lei Zhang, Jie Luo, Jie Liu, and Siyuan Yu. Mode-division multiplexed transmission of wavelength-division multiplexing signals over a 100-km single-span orbital angular momentum fiber. *Photon. Res.*, 8(7):1236–1242, 2020.
- [9] Govind P. Agrawal. *Fiber-optic communication systems*. Wiley-Interscience, 2002.
- [10] Cang Jin. “*Spatially Integrated Erbium-Doped Fiber Amplifiers Enabling Space-Division Multiplexing*”. PhD thesis, Université Laval, 2012.

- [11] Steffen Jeurink and Peter M. Krummrich. Optimization of the erbium doping profile in erbium-doped fiber amplifiers for mode-division multiplexing. In *Photonic Networks; 19th ITG-Symposium*, pages 1–4, 2018.
- [12] Steffen Jeurink and Peter M. Krummrich. Multimode edfa with scalable mode selective gain control at 1480-nm pump wavelength. *IEEE Photonics Technology Letters*, 30(9):849–852, 2018.
- [13] R. Ryf, R.-J. Essiambre, J. von Hoyningen-Huene, and P. J. Winzer. Analysis of mode-dependent gain in raman amplified few-mode fiber. In *Optical Fiber Communication Conference*, page OW1D.2, 2012.
- [14] C.R. Giles and E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 9(2):271–283, 1991.
- [15] E. Desurvire, J.L. Zyskind, and C.R. Giles. Design optimization for efficient erbium-doped fiber amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 8(11):1730–1741, 1990.
- [16] Dagong Jia, Haiwei Zhang, Zhe Ji, Neng Bai, and Guifang Li. Optical fiber amplifiers for space-division multiplexing. *Frontiers of Optoelectronics*, 5, 12 2012.
- [17] VPIphotonics. “DopedFiberMM, Stationary Rare-Earth-Doped Multimode Fiber Model”.
- [18] Sami Mumtaz, René-Jean Essiambre, and Govind P. Agrawal. Nonlinear propagation in multimode and multicore fibers: Generalization of the manakov equations. *Journal of Lightwave Technology*, 31(3):398–406, 2013.
- [19] K. Rottwitt and J.H. Povlsen. Analyzing the fundamental properties of raman amplification in optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 23(11):3597–3605, 2005.
- [20] P. Gysel and R.K. Staubli. Spectral properties of rayleigh backscattered light from single-mode fibers caused by a modulated probe signal. *Journal of Lightwave Technology*, 8(12):1792–1798, 1990.
- [21] Hernán Andrés Soto Ferrada. “Ecualización de Ptencia en Redes Ópticas WDM Basadas en Cascadas de Amplificadores Ópticos Distribuidos Raman”, Tesis de Grado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico y al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Electrónica, UTFSM, 2004.
- [22] M.N. Islam. Raman amplifiers for telecommunications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 8(3):548–559, 2002.

- [23] Sebastián Alonso Lara Aquea. “Diseño Optimizado de Amplificadores Raman Distribuidos (DFRAs) Considerando Mezcla de Cuatro Ondas”, Tesis de Grado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico y al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Electrónica, UTFSM, 2012.
- [24] Arwa Beshr and Moustafa Aly. Noise figure of distributed raman amplifier with different pumping configurations in s-band: A new approach. *Alexandria Engineering Journal*, 59, 07 2020.
- [25] Reena Sharma and Sanjeev Raghuwanshi. Raman amplifier gain dynamics with ase : Numerical analysis and simulation approach. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 7:52, 02 2016.
- [26] Optiwave Systems Inc. “Raman Amplifier-Average Power Model”.
- [27] Roland Ryf, Rene-Jean Essiambre, Johannes Hoyningen-Huene, and Peter Winzer. Analysis of mode-dependent gain in raman amplified few-mode fiber. 03 2012.
- [28] Jiaxiong Li, Jiangbing Du, Lin Ma, Ming-Jun Li, Ke Xu, and Zuyuan He. Second-order few-mode raman amplifier for mode-division multiplexed optical communication systems. *Optics Express*, 25:810, 01 2017.
- [29] OptiSystem. “Raman Amplifier-Average Power Model”.
- [30] Arwa Hassan Beshr and Moustafa H. Aly. Noise figure of distributed raman amplifier with different pumping configurations in s-band: A new approach. *Alexandria Engineering Journal*, 59(6):4329–4334, 2020.