

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

ESTUDIO, MODELADO, IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA Y ESTUDIOS DE CASOS DE AMPLIFICADORES A FIBRA RAMAN DISTRIBUIDOS EN REDES ÓPTICAS SDM

Agustín Dagoberto Espinoza Aguayo

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO

PROFESOR GUÍA: Dr. Ricardo Olivares

PROFESOR CO-REFERENTE: Dr. Marcelo Soto



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: ESTUDIO, MODELADO, IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA Y ESTUDIOS DE CASOS DE AMPLIFICADORES A FIBRA RAMAN DISTRIBUIDOS EN REDES ÓPTICAS SDM.

Nombre del candidato(a): Agustín Dagoberto Espinoza Aguayo

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Electrónica

Campus: Casa Central Valparaíso; Departamento: Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **Ricardo Olivares V.**, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 22.07.2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 10-07-2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

“Estudio, Modelado, Implementación Numérica y Estudio de Casos de Amplificadores a Fibra Raman Distribuidos en Redes Ópticas SDM”

Agustín Dagoberto Espinoza Aguayo

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico.

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

Marzo 2025

Resumen

En este trabajo se analiza el desempeño de un amplificador óptico Raman distribuido de pocos modos (Few-Mode Distributed Fiber Raman Amplifier: FM-DRFA) con bombeo de segundo orden, en el contexto de redes ópticas con multiplexación por división espacial (Space Division Multiplexing: SDM) basadas en fibras de pocos modos (Few-Mode Fiber: FMF). Para ello se utilizan modelos matemáticos de estos amplificadores, los que se implementan en computador para luego realizar simulaciones y estudio de casos.

En las simulaciones se evalúan diversos parámetros de interés, como la diferencia espectral de ganancia (Differential Spectral Gain: DSG), la diferencia de ganancia entre modos (Differential Modal Gain: DMG) y la figura de ruido, bajo distintas configuraciones y esquemas de bombeo. Con el fin de obtener un espectro de ganancia plano, con un mínimo la variación de ganancia modal, se emplea un algoritmo genético que optimiza el perfil de bombeo modal.

Los resultados obtenidos indican la efectividad del proceso de optimización llevado a cabo. Se obtienen valores de DSG cercanos a 1 dB en cada modo para longitud de onda fija y 0.5 dB para longitud de onda variable. Mientras que el DMG se mantiene menor a 0.3 dB en todos los casos. Estos resultados demuestran la efectividad del enfoque propuesto para mejorar el desempeño de amplificadores SDM basados en fibras de pocos modos.

“Estudio, Modelado, Implementación Numérica y Estudio de Casos de Amplificadores a Fibra Raman Distribuidos en Redes Ópticas SDM”

Agustín Dagoberto Espinoza Aguayo

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico.

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

Marzo 2025

Abstract

This work analyzes the performance of a few-mode distributed Raman optical amplifier (FM-DRFA) with second-order pumping, in the context of space-division multiplexing (SDM) optical networks based on few-mode fibers (FMF). Mathematical models of these amplifiers are used, implemented on a computer to carry out simulations and case studies.

The simulations evaluate various parameters of interest, such as Differential Spectral Gain (DSG), Differential Modal Gain (DMG), and the noise figure, under different configurations and pumping schemes. To obtain a flat gain spectrum with minimal modal gain variation, a genetic algorithm is employed to optimize the modal pump profile.

The results obtained indicate the effectiveness of the optimization process carried out. DSG values close to 1 dB per mode are achieved for fixed wavelengths, and 0.5 dB for variable wavelengths, while DMG remains below 0.3 dB in all cases. These results demonstrate the effectiveness of the proposed approach in improving the performance of SDM amplifiers based on few-mode fibers.

Agradecimientos

Quiero agradecer sinceramente a todas las personas que me dieron su apoyo incondicional cuando más lo necesité. Sin sus palabras de apoyo y su honestidad, que recordaba día a día, no sé si hubiese podido terminar este gran trabajo.

Agradecer a los que aprendieron junto a mí, a los que no están, y a los que me encantaría que estuvieran aquí.

Por último quiero agradecer a mis padres, que sin su apoyo no hubiese podido llevar a cabo esta carrera. Todo lo que han hecho por mí lo recuerdo con mucho cariño y espero poder retribuirles al menos un poco lo que hicieron por mí.

Vida antes que Muerte
Fuerza antes que Debilidad
Viaje antes que Destino

Tabla de Contenidos

Lista de Tablas	viii
Lista de Figuras	ix
1 Introducción	1
1.1 Estado del arte - Soluciones propuestas	2
1.1.1 Fibras SDM	3
1.2 Contexto de la memoria y objetivos	7
1.2.1 Objetivos generales	7
1.2.2 Objetivos específicos	7
1.3 Distribución de los capítulos de este trabajo	8
2 Marco Teórico	9
2.1 Introducción	9
2.2 Propagación de la luz en fibra óptica	10
2.2.1 Índices de refracción	10
2.2.2 Modos Linealmente Polarizados (LP)	11
2.2.3 Atenuación en Fibras Ópticas	16
2.2.4 Multiplexación por División de Longitud de Onda	17
2.3 Esparcimiento Raman en Fibras Ópticas	18
2.3.1 Esparcimiento Raman Espontáneo	19
2.3.2 Esparcimiento Raman Estimulado	20
2.4 Amplificación Raman	20
2.4.1 Ganancia Raman y Ancho de Banda	20
2.4.2 Amplificadores Ópticos Raman Distribuidos	21
2.4.3 Múltiples Bombeos en la Amplificación Raman	23
2.5 Análisis del Ruido en Amplificadores Raman	23
2.5.1 Emisión Espontánea Amplificada (ASE)	23

2.5.2	Figura de Ruido (NF)	24
2.5.3	Figura de Ruido de un Amplificador Raman Distribuido	25
2.6	Figura de Ruido Efectiva	27
2.7	Ecuación de Propagación en Fibras Monomodo (SMF)	29
2.8	Propagación en Fibras Multimodo	32
2.8.1	Análisis de la Propagación en Múltiples Modos	32
2.8.2	Ecuación de Propagación en Fibras Multimodo (FMF)	33
2.9	Bombeo de segundo orden	33
2.10	Algoritmo Genético	35
2.11	Resumen	36
3	Diseño y Optimización de FM-DFRA	38
3.1	Introducción	38
3.2	Resolución a partir de Análisis Numérico	38
3.2.1	Implementación del modelo mediante método de Euler	39
3.2.2	Método de Relajación [1]	41
3.2.3	Consideraciones Finales	41
3.3	Optimización mediante Algoritmo Genético	42
3.4	Resumen	46
4	Caracterización y validación de modelo matemático del amplificador Raman-FMF mediante simulación numérica	47
4.1	Introducción	47
4.2	Validación	48
4.3	Bombeo Backward	50
4.3.1	Bombeo de primer orden	50
4.3.2	Bombeo de segundo orden	53
4.4	Evaluación de NF efectiva multimodal	55
4.5	Resumen	65
5	Estudio de Casos	67
5.1	Introducción	67
5.2	Optimización de DSG y DMG en bombeo de segundo orden con 3 modos de propagación	67
5.2.1	Caso 1: Longitud de onda de bombeo fija	68
5.2.2	Caso 2: Longitud de onda de bombeo variable	71

5.3	Optimización de DSG y DMG en bombeo de segundo orden con 6 modos de propagación	75
5.3.1	Caso 1: 3 Modos de Bombeo	76
5.4	Conclusión	79
6	Conclusión	81
	Referencias	83

Lista de Tablas

2.1	Composición de los modos polarizados linealmente de bajo orden. . . .	15
4.1	Parámetros de entrada al simulador	50
4.2	Parámetros de entrada al simulador de bombeo de de 1 ^{er} orden	50
4.3	Parámetros de entrada al simulador de bombeo de 2 ^{do} orden	53
4.4	Integral de intensidad de solapamiento $f_{m,n}$ (en $10^9/m^2$) para la fibra de 4 modos LP entregada en [2].	56
4.5	Integral de intensidad de solapamiento $f_{m,n}$ (en $10^9/m^2$) para la fibra de 4 modos LP calculada en la simulación.	56
4.6	Características de la fibra de 4 modos LP entregada en [2]	56
4.7	Características de la fibra de 4 modos LP calculada en el simulador . .	56
4.8	Parámetros de entrada bombeo de 1 ^{er} orden	57
4.9	Parámetros de entrada bombeo de 2 ^{do} orden	58
4.10	Parámetros de entrada al simulador para bombeo de 1 ^{er} orden	59
4.11	Parámetros de entrada al simulador para bombeo de 2 ^{do} orden	61
5.1	Rangos de búsqueda de potencias de bombeo del algoritmo genético . .	68
5.2	Solución encontrada algoritmo genético	68
5.3	Límites longitud de onda algoritmo genético	72
5.4	Solución encontrada longitud de onda algoritmo genético	72
5.5	Límites potencia algoritmo genético	72
5.6	Solución encontrada potencia algoritmo genético	72
5.7	Límites potencia algoritmo genético	76
5.8	Solución encontrada potencia algoritmo genético	76

Lista de Figuras

1.1	Evolución de capacidad de transmisión por fibra. Letras indican bandas de transmisión [3]	2
1.2	Diseño de fibras SDM (núcleo amarillo/naranja; revestimiento: celeste)	3
1.3	Capacidad por fibra MCF experimentales (SM-MCF: Single-Mode MCF; FM-MCF: Few-Mode MCF) [3]	5
1.4	Capacidad por fibra FMF y CCF experimentales [3]	5
2.1	Esquemático de fibra óptica	10
2.2	Fibras de índice escalonado y de índice graduado	11
2.3	Curvas de propagación modos LP	14
2.4	Distribución del campo modal de intensidad para los primeros 6 modos LP en una FMF de índice escalonado.	16
2.5	Curva de atenuación en función de la longitud de onda para fibras ópticas de sílice.	17
2.6	Esquema básico de un sistema WDM con multiplexor y demultiplexor ópticos.	18
2.7	Dibujo esquemático que muestra la transición Stokes ($\omega_2 < \omega_1$) desde el estado inicial $ i\rangle$ a un estado excitado $ f\rangle$, y la transición Anti-Stokes ($\omega_2 > \omega_1$) desde $ f\rangle$ a $ i\rangle$	19
2.8	Coefficiente Raman normalizado para sílice fundida cuando las ondas de bombeo y señal están copolarizadas (línea). La curva de puntos muestra la situación en la que las ondas de bombeo y señal están polarizadas ortogonalmente.	21
2.9	Esquema de un sistema de comunicación óptica que utiliza amplificación Raman	22
2.10	Ejemplo del coeficiente de ganancia Raman con la combinación de 6 diferentes longitudes de onda y niveles de potencia de bombeo[4]. . . .	23
2.11	Cascada de amplificadores en serie	25

2.12	Sistema real y efectivo usando un amplificador discreto	26
2.13	Evolución simulada de la potencia de la señal para diferentes valores de ganancia on-off.	26
2.14	Valores simulados de NF en función de la ganancia on-off de Raman. La línea continua muestra la NF de un tramo de fibra contrapropagado con Raman, seguido de un amplificador discreto con NF de 5 dB. La línea discontinua muestra la NF del tramo de fibra bombeado por Raman por sí solo. La línea punteada indica la pérdida del tramo sin bombeo .	27
2.15	Sistema real y “efectivo” para bombeo contrapropagante Raman. Se muestra el preamplificador ficticio con ganancia $G_{\text{on-off}}$ y figura de ruido NF_{eff} , que se coloca después del tramo sin bombeo con una pérdida $\mathcal{L}$	28
2.16	Representación de bombeo de segundo orden	34
2.17	Comparativa de uso bombeo de segundo orden (línea continua) y primer orden (línea segmentada)[5]	34
3.1	Diagrama de flujo del algoritmo genético usado para la optimización del perfil de bombeo en un FM-DRFA	45
4.1	Curva de coeficiente de ganancia Raman entregada en VPIPhotonics®	49
4.2	Curva de coeficiente de ganancia Raman extendida	49
4.3	Evolución de potencia de señal de 1 ^{er} orden	51
4.4	Evolución de potencia de bombeo backward de 1 ^{er} orden	51
4.5	Potencia ASE al final de la fibra de 1 ^{er} orden	52
4.6	Ganancia de 1 ^{er} orden	52
4.7	Evolución de potencia de señal de 2 ^{do} orden	53
4.8	Evolución de potencia de bombeo backward de 2 ^{do} orden	54
4.9	Potencia ASE al final de la fibra de 2 ^{do} orden	54
4.10	Ganancia de 2 ^{do} orden	55
4.11	Ganancia On-Off de primer orden entregada en [2]	57
4.12	Potencia ASE de primer orden entregada en [2]	58
4.13	Ganancia On-Off de Segundo Orden entregada en [2]	58
4.14	Potencia ASE de Segundo Orden entregada en [2]	59
4.15	Ganancia On-Off de 1 ^{er} orden obtenida en el Simulador	60
4.16	Ruido ASE en la salida de 1 ^{er} orden obtenida en el simulador	60
4.17	Ganancia On-Off de 2 ^{do} orden obtenida en el simulador	61
4.18	Ruido ASE en la salida de 2 ^{do} orden obtenida en el simulador	62

4.19	NF efectivo y potencia de bombeo total como función del bombeo de 1455 nm para el modo LP_{01} , la ganancia está fija en 4dB [2].	63
4.20	NF efectivo y potencia de bombeo total como función del bombeo de 1455 nm para el modo LP_{01} , la ganancia está fija en 3.8 dB [2].	63
4.21	NF efectiva y potencia de bombeo total como función del bombeo de 1455 nm para el modo LP_{01} , la ganancia está fija en 4 dB modelado . .	64
4.22	NF efectiva y potencia de bombeo total como función del bombeo de 1455 nm para el modo LP_{11} , la ganancia está fija en 3.8 dB modelado .	64
5.1	Evolución de potencia de señal	69
5.2	Evolución de potencia de bombeo	69
5.3	Ganancia On-Off y DMG	70
5.4	Potencia de señal y ASE a la salida del amplificador	70
5.5	Figura de Ruido Efectiva	71
5.6	Evolución de potencia de señal	73
5.7	Evolución de potencia de bombeo	73
5.8	Ganancia On-Off y DMG	74
5.9	Potencia de señal y ASE a la salida del amplificador	74
5.10	Figura de ruido efectiva	75
5.11	Evolución de potencia de señal	77
5.12	Evolución de potencia de bombeo	77
5.13	Ganancia On-Off y DMG	78
5.14	Potencia de señal y ASE a la salida del amplificador	78
5.15	Figura de ruido efectiva	79

Abreviaciones

- **ASE**: Amplified Spontaneous Emission
- **DSG**: Differential Spectral Gain
- **DMG**: Differential Mode Gain
- **DRFA**: Distributed Raman Fiber Amplifier
- **FMF**: Few Mode Fiber
- **GA**: Genetic Algorithm
- **LP**: Linearly Polarized
- **MCF**: Multi-Core Fiber
- **MDG**: Mode Dependant 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**: Wavelength Division Multiplexing

Capítulo 1

Introducción

Las fibras ópticas se han convertido en el principal canal de comunicación gracias a sus favorables características de propagación, tales como la baja interferencia electrónica, la propagación a bajas pérdidas ($\sim 0.2 \text{ dB/Km}$) a 1550 nm de longitud de onda, la implementación de amplificadores ópticos y las técnicas de gestión de la dispersión cromática (Chromatic Dispersion: CD) para reducir el impacto de efectos no lineales de propagación, entre otros. Además, ofrecen una capacidad de transmisión extremadamente alta gracias a su amplio ancho de banda (Bandwidth: BW), que permite transportar grandes volúmenes de datos a altas velocidades, lo cual es fundamental para satisfacer la creciente demanda de servicios de telecomunicaciones y aplicaciones de alta velocidad.

Con la implementación de fibras ópticas se creía que estas iban a ser capaz de transmitir toda la información que el ser humano podría pensar. Esta percepción cambió radicalmente al inicio del milenio, con la introducción de teléfonos inteligentes, servicios de internet de gran ancho de banda y el crecimiento del Internet de las cosas (Internet of Things: IoT). Debido a esto, la demanda ha crecido a una tasa de 40%-60% año tras año, es decir, el tráfico de internet se ha ido duplicando 1.5 veces cada dos años [3]. A raíz de las investigaciones teóricas se ha establecido que la industria de las telecomunicaciones llegará al llamado “Capacity Crunch” eventualmente, ya que la capacidad de los sistemas de transmisión óptica demuestran que las fibras monomodo convencionales (Single Mode Fiber: SMF) se están acercando al límite de capacidad no lineal de Shannon, que define la máxima capacidad de transmisión mediante el ancho de banda de transmisión y el ratio señal a ruido (Signal-to-Noise Ratio: SNR)[6].

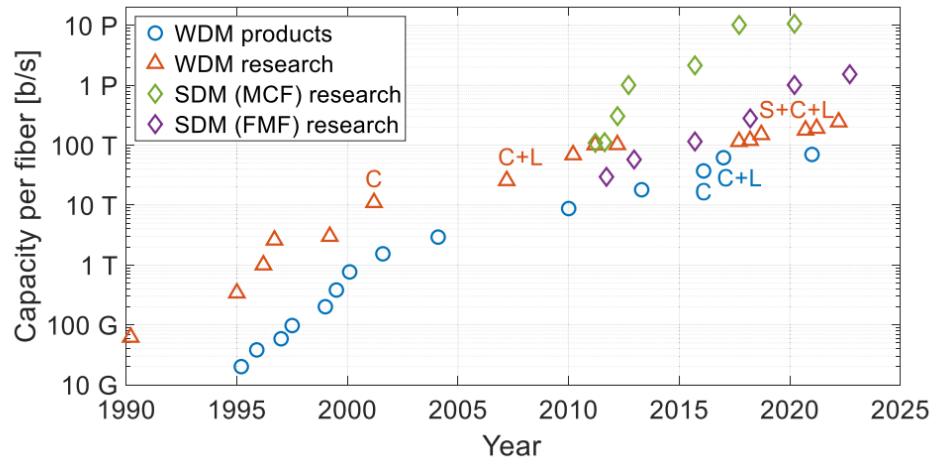


Figura 1.1: Evolución de capacidad de transmisión por fibra. Letras indican bandas de transmisión [3]

Como se observa en la Figura 1.1 que muestra la capacidad de transmisión por fibra en el año respectivo, los indicadores azul y naranja reflejan los productos comerciales y de investigación de multiplexación por longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing: WDM) en SMF, mientras que en verde y morado se enseña como la capacidad va en aumento tanto en fibras de múltiples núcleos (Multi-Core Fiber: MCF) y en fibras de pocos modos (Few-Mode Fiber: FMF) respectivamente, que serán tópicos a tratar en la siguiente sección.

1.1 Estado del arte - Soluciones propuestas

Para aumentar el ancho de banda de transmisión es necesario explotar una nueva multiplexación que no esté siendo aplicada al día de hoy. Dicha segmentación será la multiplexación por división espacial (Space Division Multiplexing: SDM), la cual mediante MCF, múltiples elementos, múltiples modos (Multi-Mode Fiber: MMF), FMF, entre otras, se consideran los principales saltos para superar el límite de capacidad de fibras ópticas convencionales [7].

En particular, una SMF no permite la transmisión de múltiples modos espaciales debido a su reducido ancho de núcleo, que restringe la propagación a un único modo fundamental a las longitudes de onda de interés.

1.1.1 Fibras SDM

El concepto básico de SDM se basa en colocar en una determinada estructura o disposición de fibras numerosos canales espaciales. El tipo de canales varía dependiendo de qué factor de SDM se esté explotando (núcleo, modal o espacial). Como se observa en la Figura 1.2 existen múltiples alternativas para realizar SDM.

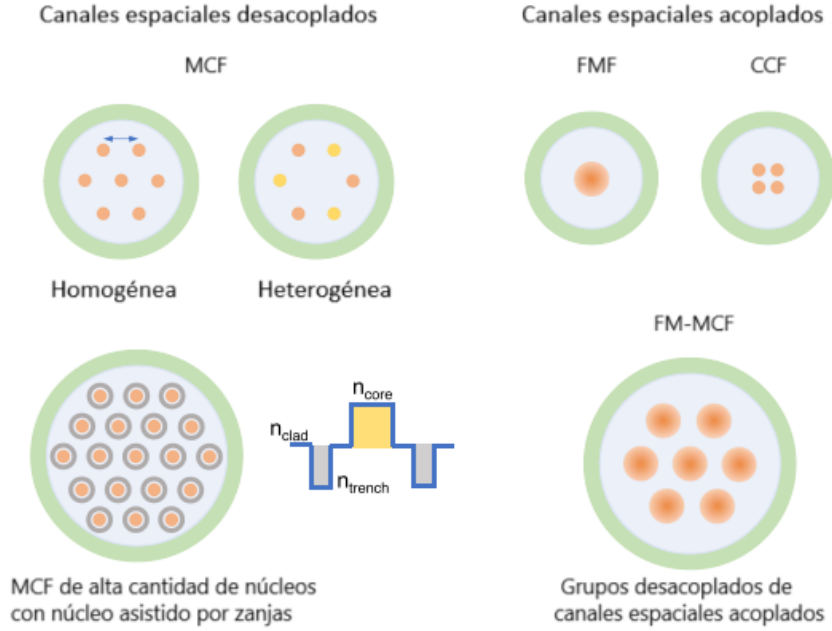


Figura 1.2: Diseño de fibras SDM (núcleo amarillo/naranja; revestimiento: celeste)

Cinta de Fibras SMF

Los primeros intentos de realizar SDM se realizaron mediante cintas SMF, es decir, muchos SMF convencionales (que van desde decenas a cientos de SMF) unidos, que juntos crean un empaquetado de fibras grueso o un cable plano.

El empaquetado de fibra ofrece hasta cientos de enlaces paralelos, a expensas de su gran dimensión, lo que hace que sea menos eficiente en cuanto a espacio. Un ejemplo son los cables submarinos, los cuales están limitados en el diámetro para asegurar un alto nivel de confiabilidad en condiciones de aguas profundas. En el resto de sistemas (larga distancia, regional y metro) están limitados por el espacio disponible entre los conductos y las dificultades de instalar cables a través de conductos existentes, al igual que la capacidad para transportar carretes de cables pesados.[3]

Paralelismo espacial desacoplado (Multiplexación por división de Núcleos)

El concepto de tener canales espaciales paralelos (es decir, núcleos) físicamente separados mientras se integran en la misma estructura de revestimiento ha llevado al diseño de MCF. En este caso de fibras ópticas se aumenta a N canales, siendo N el número de núcleos de la fibra óptica, los cuales pueden llevar M canales WDM, aumentando la cantidad de canales en N . La restricción más importante en los MCF es el “crosstalk” entre núcleos, en otras palabras, la cantidad de potencia de señal óptica que se “fuga” de los núcleos adyacentes a uno específico, causando interferencia con la señal que ya se propaga allí, esto debido a perturbaciones aleatorias en el índice de refracción causado por fluctuaciones estructurales, imperfecciones en la manufactura, curvas o tensiones. Para solucionar esto se ha planteado diferentes perfiles de índice de refracción para reducir el “crosstalk” entre núcleos [7]. Núcleos individuales pueden ser nominalmente idénticos (MCFs homogénea) o deliberadamente diferentes (MCFs heterogénea) en términos de su tamaño y su índice de refracción [8]. Por otro lado el perfil de núcleo asistido por zanja (trench-assisted core profile) utiliza un índice de refracción en zanja alrededor de cada núcleo para suprimir crosstalk entre núcleos [9]. La disposición heterogénea de núcleos puede adicionalmente suprimir crosstalk entre núcleos con un costo de complejidad en la fabricación [10].

Una CCF (coupled-core MCFs) es típicamente compuesta por pocos (4 ó 7) núcleos monomodo homogéneos que están ubicados justo a la distancia correcta entre sí para permitir un fuerte acoplamiento aleatorio.[3]

Se puede observar en la Figura 1.3 la capacidad de fibras MCF experimentales en un sólo tramo (marcador rojo) y múltiples tramos (marcador naranja) además de proporcionar información respecto al tipo de fibra, el diámetro del revestimiento y la distancia de transmisión.[3]

Paralelismo espacial acoplado (Multiplexación por división de modos)

El concepto de tener canales espaciales paralelos acoplados (es decir, modos) mientras se integran en la misma estructura de núcleo ha llevado al diseño MMF y FMF. En este caso se aumenta a M canales, siendo M el número de modos posibles de la fibra óptica, los cuales pueden llevar N canales WDM, aumentando la cantidad de canales en M .

Las MMFs operan eficientemente en cortas distancias, tal como las decenas de metros. Los principales obstáculos con las MMFs, especialmente cuando se tienen múltiples modos co-propagándose, son la **dispersión modal**, **interferencia modal**

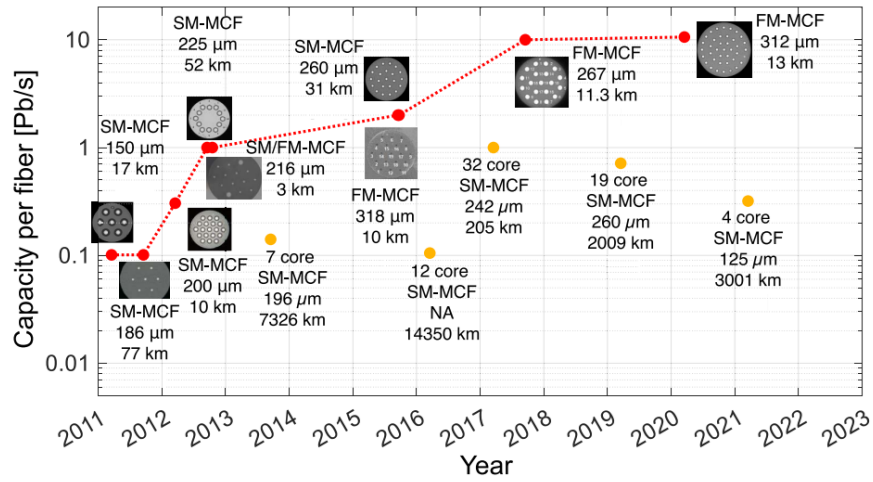


Figura 1.3: Capacidad por fibra MCF experimentales (SM-MCF: Single-Mode MCF; FM-MCF: Few-Mode MCF) [3]

y un alto **retraso diferencial por grupo de modos** (Differential Mode Group Delay: DMDG), que hace que transmisiones de largo alcance sean imposibles. En orden de superar este limitante es que se propuso las fibras de pocos modos [11]. Las FMFs son en principio iguales que las MMFs, pero manufacturadas para permitir la propagación de menos modos LP, logrando la comunicación a largas distancias.

Asimismo se puede observar en la figura 1.4 la capacidad de fibras FMF experimentales en un sólo tramo (marcador rojo) y múltiples tramos (marcador azul) además de experimentos de transmisión mediante CCF (marcador verde). Donde en todos los casos el diámetro del revestimiento es de $125 \mu\text{m}$.

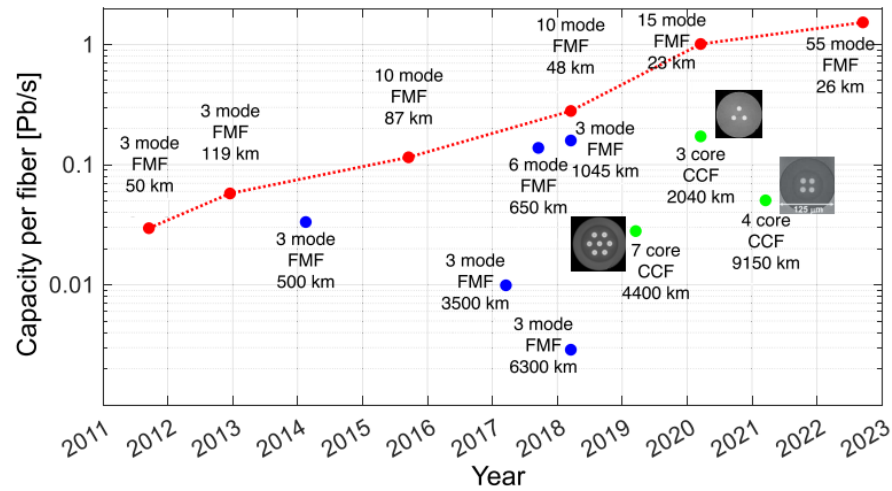


Figura 1.4: Capacidad por fibra FMF y CCF experimentales [3]

Combinaciones de paralelismos espaciales acoplados y desacoplados

Se han planteado combinaciones de tipos de fibras SDM acopladas y desacopladas para lograr tanto la multiplexación por núcleo como la multiplexación modal. En las MCF de pocos modos (Few-Mode Multi-Core fiber: FM-MCF), cada núcleo de un MCF de núcleo desacoplado admite múltiples modos espaciales acoplados. En este caso de fibras ópticas se aumenta a M núcleos y N modos, aumentando la cantidad de canales en $M \times N$.

Hasta ahora, las FM-MCF han logrado el mayor número de canales espaciales en un solo hilo de fibra. Se han informado fibras que se han fabricado que soportan hasta 120 canales espaciales (12 núcleos más 10 modos espaciales por núcleo, con un diámetro de revestimiento de $217 \mu\text{m}$) [12] y de fibras experimentales de 114 canales espaciales (19 núcleos más 6 modos espaciales por núcleo, con un diámetro de revestimiento de $267 \mu\text{m}$ [13] y de 38 núcleos más 3 modos espaciales con un diámetro de revestimiento de $312 \mu\text{m}$ [14]) Alcanzando una capacidad de transmisión cercana a 10 Pb/s.

Amplificadores ópticos

La amplificación es un aspecto crucial en una red, especialmente para enlaces de larga distancia ya que es la encargada de compensar las pérdidas producidas por la misma fibra. Dentro de la amplificación se encuentran los amplificadores de fibra dopada (Doped Fiber Amplifier: DFA), los cuales principalmente utilizan Erblio (Erbium Doper Fiber Amplifier: EDFA) cuya característica es producir altas ganancias con una figura de ruido (Noise Figure: NF) importante debido a su condición de amplificador concentrado en la banda C y los amplificadores distribuidos Raman (DRA: Distributed Raman Amplifiers) que producen bajas ganancias y a su vez presentan un mejor NF gracias a la amplificación distribuida, además de tener un ancho de banda de amplificación mayor. A día de hoy se han presentado tanto amplificadores EDFA de múltiples modos [15] con 266 Tbit/s en 90.4 km utilizando 6 modos en la banda C-L y de múltiples núcleos [16] con 200 Gbit/s en 110 km utilizando 7 núcleos. Por otro lado, en los amplificadores distribuidos Raman se tiene [17] con 20 Gbit/s en 75 km utilizando 4 modos en la banda C. Mientras que no se obtienen muchos avances en múltiples núcleos, sí podemos encontrar hallazgos recién en procesos de demostraciones matemáticas del comportamiento del crosstalk entre núcleos para fibras débilmente acopladas [18].

Ambos amplificadores no están exentos de nuevos desafíos, ya que al tener múltiples modos se tiene Diferencia de Ganancia Modal (DMG: Differential Modal Gain),

la cual explica la diferencia de ganancia entre modos, puesto que en la propagación estos tienen distintas variables asociadas. Adicionalmente, incluso en configuraciones monomodo, los amplificadores ópticos ya enfrentan la Diferencia de Ganancia Espectral (DSG: Differential Spectral Gain), que representa la variación de ganancia entre distintas longitudes de onda, lo cual puede afectar significativamente la uniformidad de amplificación en sistemas WDM. Por su parte, cuando se trabaja con múltiples núcleos, también debe considerarse el ya explicado crosstalk entre núcleos.

En consecuencia, el diseño de amplificadores ópticos para comunicaciones de larga distancia debe abordar desafíos clave como la minimización de DMG y DSG, a fin de asegurar una amplificación uniforme tanto entre modos espaciales como a lo largo del espectro. Además, es fundamental que estos amplificadores logren cubrir un amplio ancho de banda, compatible con esquemas de multiplexación por división en longitud de onda (WDM), para responder a las crecientes demandas de capacidad en redes ópticas avanzadas.

En este contexto, los amplificadores Raman de fibra multimodo distribuidos (FM-DFRA: Few-Mode Distributed Raman Amplifiers) emergen como una solución prometedora, al ofrecer una amplificación simultáneamente modal y espectralmente balanceada a lo largo de distancias extendidas. Sin embargo, enfoques existentes como los reportados en [19] y [20] aún presentan limitaciones importantes: ya sea por operar con un número reducido de longitudes de onda WDM o por tratarse de demostraciones experimentales preliminares, sin un diseño optimizado del bombeo ni una cobertura espectral amplia. Esta situación evidencia la necesidad de avanzar hacia estrategias de diseño más sofisticadas para FM-DFRA, que permitan alcanzar un desempeño superior en términos de DMG, DSG y ancho de banda efectivo, contribuyendo así al desarrollo de soluciones escalables para redes ópticas de próxima generación.

1.2 Contexto de la memoria y objetivos

1.2.1 Objetivos generales

- Optimizar el diseño de FM-DFRA con bombeo de segundo orden a través de simulación numérica en computador y estudios de casos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudiar de redes ópticas SDM y tecnologías habilitantes.

- Estudiar modelos matemáticos de FM-DFRA y su implementación en computador
- Optimizar el diseño de FM-DFRA de segundo orden a través de algoritmos genéticos.
- Estudio de casos para evaluar el desempeño de los perfiles de bombeo diseñados.

1.3 Distribución de los capítulos de este trabajo

La distribución de este trabajo es el siguiente: El Capítulo 2 es un marco teórico explicativo de todo lo necesario para el trabajo de esta memoria, desde fenómenos físicos hasta el desarrollo de la ecuación de propagación de potencia de un amplificador Raman multimodo. El Capítulo 3 explica el diseño y método de optimización. En el Capítulo 4 se presenta una validación y caracterización del modelo, mediante la simulación del amplificador óptico. El Capítulo 5 presenta resultados obtenidos durante el estudio de casos de interés. Por último, el Capítulo 6 presenta las conclusiones del trabajo junto al trabajo futuro propuesto.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo establecer una base sólida de los conceptos fundamentales y modelos matemáticos que rigen la propagación de la luz en fibras ópticas y la amplificación Raman. Para ello, se revisan los principios básicos como los índices de refracción, la reflexión interna total y la formación de modos en fibras ópticas

Se abordan en detalle fenómenos clave como el esparcimiento Raman, distinguiendo entre sus manifestaciones espontáneas y estimuladas, y se analizan sus aplicaciones en la amplificación distribuida de señales ópticas. Asimismo, se exploran los efectos del ruido, la emisión espontánea amplificada (Amplified Spontaneous Emission: ASE) y la NF, elementos críticos para la evaluación del desempeño en sistemas de telecomunicaciones ópticas.

El capítulo también extiende el análisis a la propagación en fibras multimodo, considerando el solapamiento entre modos y DMG, lo cual resulta esencial para optimizar la utilización de la fibra en aplicaciones de alta capacidad. Finalmente, se introduce el uso de algoritmos genéticos como herramienta de optimización para ajustar parámetros relevantes, tales como la potencia y la longitud de onda de bombeo, con el fin de minimizar variables críticas como el DMG y DSG para lograr un perfil de ganancia uniforme. Estos fundamentos teóricos constituyen la base indispensable para el diseño y análisis de sistemas ópticos avanzados, y sientan las bases para los desarrollos y optimizaciones presentados en capítulos posteriores.

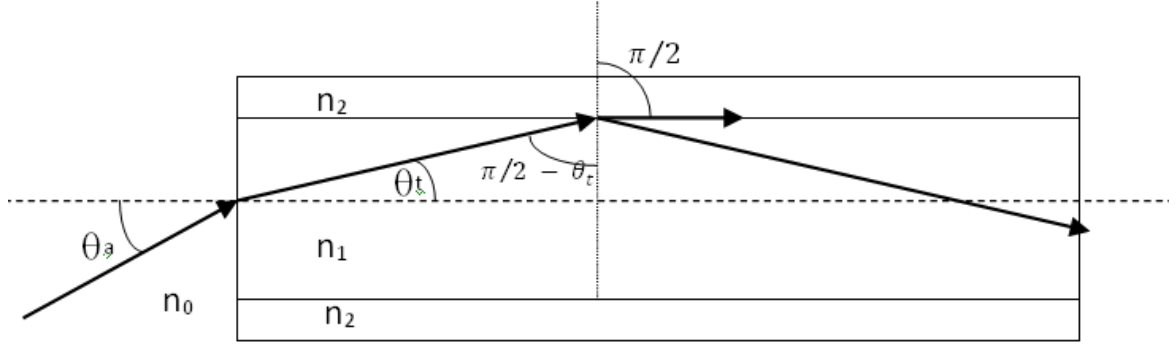


Figura 2.1: Esquemático de fibra óptica

2.2 Propagación de la luz en fibra óptica

2.2.1 Índices de refracción

Una fibra óptica se compone por su núcleo de sílice (core) rodeado por un revestimiento (cladding). El principio físico que permite la propagación de la luz dentro de una fibra es la reflexión interna total, que ocurre cuando la luz intenta pasar de un medio con un índice de refracción mayor a uno con un índice de refracción menor, bajo ciertas condiciones.

- Índice de Refracción (n): Es una propiedad óptica que indica cómo la luz se propaga en un medio. Se define por la razón entre la velocidad de la luz (c) y la velocidad en el medio (v).

$$n = \frac{c}{v}$$

En una fibra óptica:

- El núcleo tiene un índice de refracción n_1 .
- El revestimiento tiene un índice de refracción $n_2 < n_1$

Además de cumplir esta condición, es necesario también que el rayo de luz que viaja hacia la fibra cumpla con ser mayor al ángulo crítico, el cual se define como:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Mientras el ángulo de incidencia sea mayor a θ_c , la luz se reflejará dentro del núcleo.

En la Figura 2.1 se puede observar un esquemático de una fibra óptica de un núcleo, con θ_a el ángulo de entrada y n_0 el aire.

Existen múltiples formas de disposición para el núcleo y el revestimiento. Dentro de las más comunes se encuentra el índice escalonado y el índice gradual, como se puede observar en la Figura 2.2, donde en este trabajo sólo se utilizará índice escalonado.

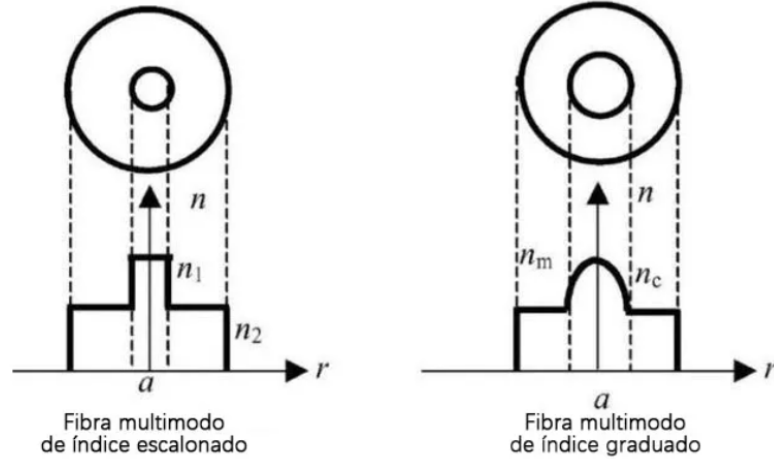


Figura 2.2: Fibras de índice escalonado y de índice graduado

2.2.2 Modos Linealmente Polarizados (LP)

Los modos linealmente polarizados (LP) son una aproximación útil para describir la propagación de la luz en fibras ópticas con una pequeña diferencia entre los índices de refracción del núcleo y el revestimiento. Esta aproximación simplifica el análisis de los modos de propagación al agrupar soluciones vectoriales exactas de las ecuaciones de Maxwell en modos escalares, lo que facilita su interpretación física y su aplicación en el diseño de fibras ópticas.[21]

Origen de los Modos Vectoriales

Las soluciones exactas de las ecuaciones de Maxwell (2.1) para una fibra óptica con índice escalonado dan lugar a modos vectoriales, que se clasifican en cuatro categorías principales: modos TE (Transversal Eléctrico), TM (Transversal Magnético), EH (Híbrido Eléctrico) y HE (Híbrido Magnético). Estos modos describen la distribución espacial del campo eléctrico y magnético en la fibra y están asociados a condiciones de contorno específicas.[21]

Sin embargo, cuando la diferencia entre los índices de refracción del núcleo (n_1) y el revestimiento (n_2) es pequeña, los modos vectoriales pueden agruparse en modos escalares aproximados, conocidos como modos LP. Esta aproximación es válida porque, en este régimen, las componentes longitudinales del campo electromagnético son pe-

queñas en comparación con las componentes transversales, lo que permite despreciar ciertos términos en las ecuaciones de Maxwell, obteniendo la siguiente ecuación:

$$\nabla^2 \tilde{\mathbf{E}} + n^2(\omega) k_0^2 \tilde{\mathbf{E}} = 0 \quad (2.1)$$

Donde $\tilde{\mathbf{E}}$ es la transformada de Fourier de $\mathbf{E}$, que es el vector de campo eléctrico. n es el índice de refracción que dependerá de la frecuencia angular y k_0 es el número de onda en el vacío.

Modos Vectoriales Exactos

En una fibra óptica, las soluciones exactas de las ecuaciones de Maxwell para los modos guiados se clasifican en cuatro categorías principales:

- Modos TE (Transversal Eléctrico): No tienen componente longitudinal del campo eléctrico ($E_z = 0$).
- Modos TM (Transversal Magnético): No tienen componente longitudinal del campo magnético ($H_z = 0$).
- Modos EH (Híbrido Eléctrico): Tienen componentes longitudinales tanto del campo eléctrico como del magnético, pero la componente eléctrica es dominante.
- Modos HE (Híbrido Magnético): También tienen componentes longitudinales de ambos campos, pero la componente magnética es dominante.

Cada uno de estos modos tiene una distribución específica del campo electromagnético en la fibra, y están caracterizados por números azimutales (l) y radiales (m).

Deducción de los Modos LP desde las Ecuaciones de Maxwell

El análisis modal en fibras ópticas comienza con las ecuaciones de Maxwell, que describen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos en medios dieléctricos. En ausencia de fuentes libres, estas ecuaciones se escriben como:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad \nabla \times \mathbf{H} = \epsilon(\mathbf{r}) \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad \nabla \cdot [\epsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}] = 0 \quad \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (2.2)$$

Donde $\epsilon(\mathbf{r})$ es la permitividad dieléctrica espacialmente dependiente, μ_0 es la permeabilidad del vacío, y $\mathbf{E}$ y $\mathbf{H}$ son los campos eléctricos y magnéticos, respectivamente.

Asumiendo que los campos varían en el tiempo de forma armónica, es decir, con una dependencia temporal del tipo $e^{-j\omega t}$, se pueden transformar las ecuaciones de Maxwell al dominio de la frecuencia. En este dominio, las derivadas temporales se reemplazan por multiplicaciones por $-j\omega$, lo que simplifica el análisis matemático. A partir de estas ecuaciones transformadas, y aplicando la identidad vectorial $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$, se puede derivar una ecuación de onda vectorial para el campo eléctrico:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 n^2(\mathbf{r}) \mathbf{E} = 0 \quad (2.3)$$

donde $k_0 = \omega/c$ es el número de onda en el vacío y $n(\mathbf{r})$ es el índice de refracción espacialmente dependiente.

La solución general de esta ecuación es compleja debido al acoplamiento entre las componentes del campo vectorial. Sin embargo, en fibras ópticas con un pequeño salto de índice entre el núcleo (n_1) y el revestimiento (n_2), se puede aplicar la aproximación de índice débil, que permite desacoplar las componentes longitudinales y transversales del campo. En este régimen, las componentes longitudinales (E_z , H_z) son pequeñas y se pueden despreciar para obtener una ecuación escalar del tipo:

$$\nabla_T^2 \psi + [n^2(x, y)k_0^2 - \beta^2] \psi = 0 \quad (2.4)$$

Aquí, ψ representa una componente transversal dominante del campo eléctrico o magnético, ∇_T^2 es el operador laplaciano transversal, y β es la constante de propagación del modo.

Esta es la ecuación de Helmholtz escalar, cuya solución define los modos linealmente polarizados (LP). Cada solución corresponde a una distribución modal específica que satisface las condiciones de contorno en la interfase núcleo-revestimiento.[21, 22]

Por último, en la Figura 2.3, se puede observar el comportamiento de los modos LP en su curva característica.

Características de los Modos LP

Cada modo LP se designa como LP_{lm} , donde:

- l es el número azimutal, que indica la variación angular del campo en la sección transversal de la fibra.
- m es el número radial, que describe la variación radial del campo.

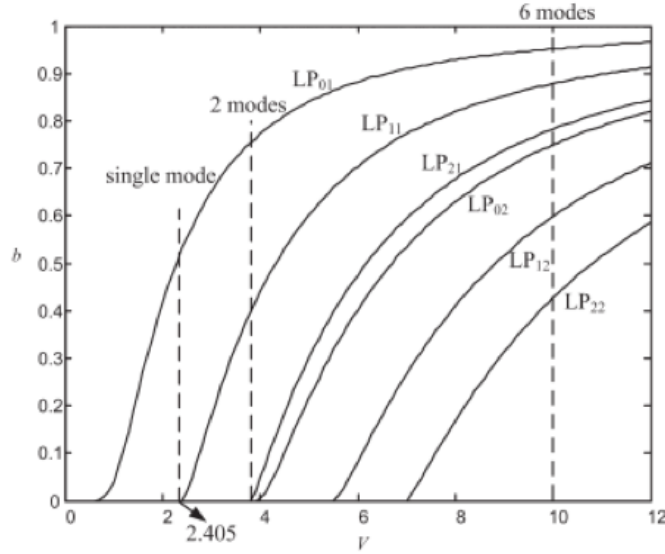


Figura 2.3: Curvas de propagación modos LP

Los modos LP son combinaciones lineales de los modos vectoriales exactos (TE, TM, EH, HE) y representan una simplificación que permite describir la propagación de la luz en términos de campos escalares. Por ejemplo:

- El modo LP_{01} corresponde a la combinación de dos modos HE_{11}
- El modo LP_{11} agrupa los modos TE_{01} , TM_{01} y dos modos HE_{21}

Esta agrupación reduce la complejidad matemática y proporciona una descripción más intuitiva de los patrones de campo en la fibra.

El modo LP_{01} es el modo LP más básico y el primero en propagarse en una fibra óptica y corresponde a la combinación de dos modos HE_{11} . Esto se debe a lo siguiente.

- El modo HE_{11} tiene una distribución de campo que puede descomponerse en dos polarizaciones ortogonales (por ejemplo, en las direcciones x e y)
- Estas dos polarizaciones son degeneradas, es decir, tienen la misma constante de propagación (β) y la misma distribución espacial del campo, pero están orientadas perpendicularmente entre sí.

Por lo tanto, el modo LP_{01} representa la combinación de las dos polarizaciones del modo HE_{11} .

Ventajas de la Aproximación LP

La aproximación LP es especialmente útil porque:

- Simplifica el análisis matemático: Al trabajar con modos escalares en lugar de modos vectoriales, se reducen las ecuaciones diferenciales parciales a formas más manejables.
- Facilita la interpretación física: Los modos LP tienen patrones de campo transversales que son fáciles de visualizar y medir experimentalmente.
- Es precisa para fibras con baja diferencia de índice: En fibras ópticas estándar, la aproximación LP proporciona resultados muy cercanos a las soluciones exactas.

Ejemplos de Modos LP de Bajo Orden

En la Tabla 2.1 se muestran los modos LP de bajo orden, su correspondencia con los modos vectoriales exactos y el número de modos degenerados y en la Figura 2.4 se muestra la distribución del campo modal de intensidad para los primeros 6 modos LP.

Tabla 2.1: Composición de los modos polarizados linealmente de bajo orden.

Designación del modo LP	Designación del modo tradicional y número de modos	Número de modos degenerados
LP ₀₁	HE ₁₁ × 2	2
LP ₁₁	TE ₀₁ , TM ₀₁ , HE ₁₁ × 2	4
LP ₂₁	EH ₁₁ × 2, HE ₁₁ × 2	4

Propagación de Múltiples Modos en una Fibra Óptica

En una fibra de pocos modos, solo se excitan una pequeña cantidad de modos (alrededor de 15 [23]), lo que reduce la complejidad de la propagación en comparación con las MMF. Los modos que se propagan dependen de las condiciones de acoplamiento de la luz y de los parámetros de la fibra.

Ventajas de las Fibras de Pocos Modos

- Reducción de la Dispersión Modal: Al limitar el número de modos que se propagan, las fibras de pocos modos reducen significativamente la dispersión modal en comparación con las fibras multimodo. Esto permite una mayor capacidad

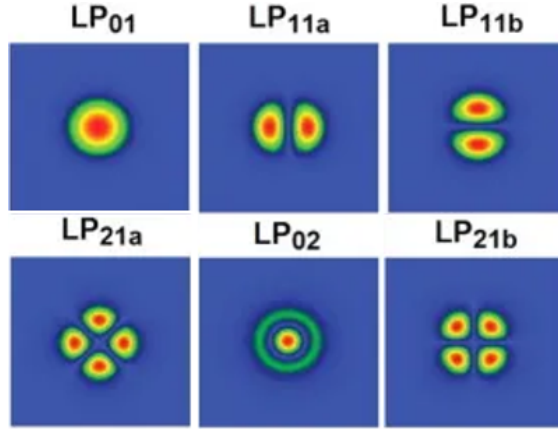


Figura 2.4: Distribución del campo modal de intensidad para los primeros 6 modos LP en una FMF de índice escalonado.

de transmisión y distancias más largas. Un ejemplo es la transmisión máxima de 22.8 kilómetros para 30 modos de polarización [7].

- Mayor Capacidad de Transmisión: Las fibras de pocos modos permiten la multiplexación por división de modos (MDM), donde cada modo puede transportar un canal de información independiente. Esto aumenta la capacidad total de transmisión de la fibra. En este caso se aumentan los canales por la cantidad de modos propagados.

2.2.3 Atenuación en Fibras Ópticas

Dentro de la propagación de luz en una fibra óptica, se encuentran los siguientes mecanismos que causan la atenuación en una fibra óptica:

- Absorción del material
 - Absorción intrínseca: Corresponde a la absorción del sílice (material utilizado para hacer fibras)
 - Absorción extrínseca: Corresponde a las pérdidas por impurezas del sílice.
- Dispersión de Rayleigh: La dispersión de Rayleigh es un mecanismo de pérdida fundamental que surge de fluctuaciones microscópicas locales en la densidad. Las fluctuaciones de densidad conducen a fluctuaciones aleatorias de el índice de refracción en una escala menor que la longitud de onda óptica λ .
- Imperfecciones en la guía de onda: Una fibra monomodo ideal con una geometría cilíndrica perfecta guía el modo óptico sin fugas de energía hacia la

capa de revestimiento. En la práctica, las imperfecciones en la interfaz núcleo-revestimiento (por ejemplo, variaciones aleatorias del radio del núcleo) pueden provocar pérdidas adicionales que contribuyen a la pérdida neta de fibra.

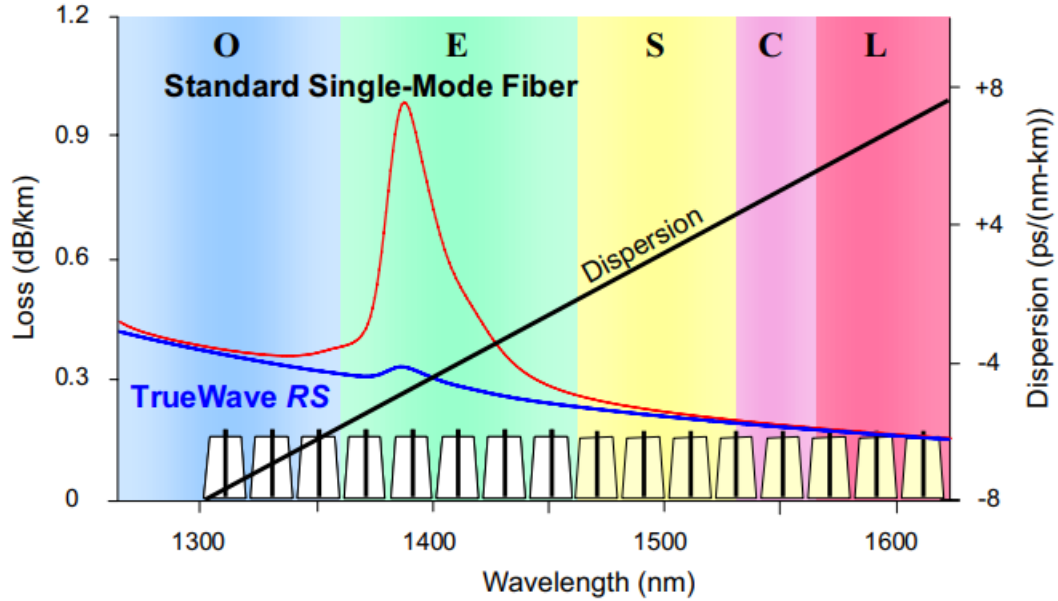


Figura 2.5: Curva de atenuación en función de la longitud de onda para fibras ópticas de sílice.

Donde en la Figura 2.5 se observa con línea roja los primeros valores aproximados de pérdida de una fibra óptica, y la línea azul representa los valores actuales de una fibra Truewave[®]

Cabe destacar que aunque la dispersión es un fenómeno que afecta la propagación de señales ópticas al causar ensanchamiento temporal de los pulsos, el foco de este trabajo está en la atenuación como el factor principal que limita la transmisión de potencia a lo largo de la fibra. La comprensión de la atenuación es esencial para el diseño y optimización de amplificadores Raman.

2.2.4 Multiplexación por División de Longitud de Onda

La Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM: Wavelength Division Multiplexing) corresponde al esquema en el que se modulan múltiples portadoras ópticas en diferentes longitudes de onda independientes y luego se transmiten a través de la misma fibra. La técnica WDM nos permite aprovechar el gran ancho de banda

que ofrecen las fibras ópticas, incrementando la capacidad al transmitir N canales extra.

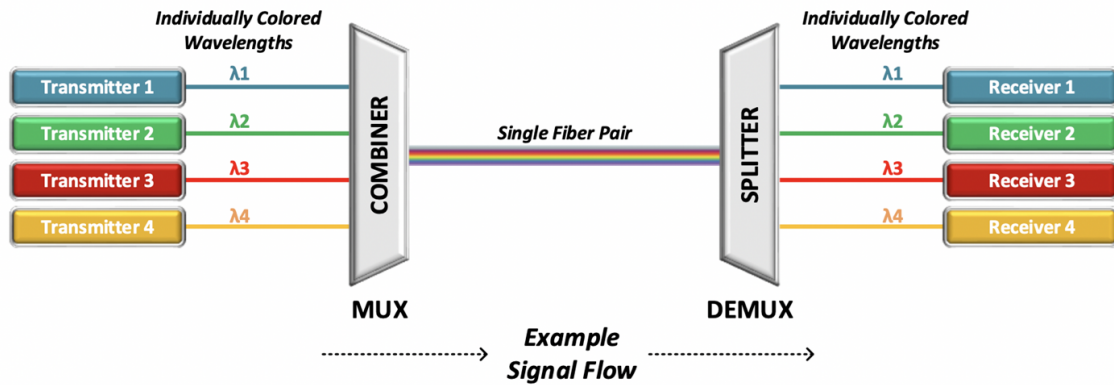


Figura 2.6: Esquema básico de un sistema WDM con multiplexor y demultiplexor ópticos.

Si bien, esto aumenta la capacidad de transmisión, no está libre de desafíos.

- Efectos No Lineales: La alta potencia óptica y la proximidad de las longitudes de onda pueden provocar efectos como FWM, SPM, XPM, afectando la integridad de la señal.
- Gestión del Ruido: El ruido generado por efectos no lineales puede degradar la calidad de la señal.

Por último, es importante destacar que esta técnica permite la capacidad vista en la Figura 1.1 que es cercano a 100 Terabytes en el marco de la investigación y 10 Terabytes para el mercado actual.

2.3 Esparcimiento Raman en Fibras Ópticas

Cuando la luz viaja a través de la fibra, los fotones pueden ser absorbidos, dispersados o simplemente no interactuar con el material, permitiendo que pasen a través de ella. Si la energía de un fotón incidente coincide con la brecha de energía entre el estado fundamental de una molécula y un estado excitado, el fotón puede ser absorbido, promoviendo así a la molécula al estado excitado de mayor energía. Sin embargo, también es posible que el fotón interactúe con la molécula y se disperse en ella. En estos casos, no es necesario que el fotón tenga una energía que coincida con la diferencia entre dos niveles de energía de la molécula.

La energía se transferirá ya sea de un fotón incidente a la molécula (Stokes), o de la molécula al fotón dispersado (Anti-Stokes). En estos casos, este proceso es inelástico y la energía del fotón dispersado es diferente a la del fotón incidente.

Dentro del proceso Stokes, desde el estado vibracional fundamental $|i\rangle$ conduce a la absorción de energía por parte de la molécula y su promoción al estado vibracional excitado $|f\rangle$ de mayor energía, liberando así un fotón de menor energía (frecuencia menor). Sin embargo, debido a la energía térmica, algunas moléculas pueden estar presentes inicialmente en un estado excitado, representado por $|f\rangle$ en la Figura 2.7. La dispersión desde estos estados al estado fundamental $|i\rangle$ se llama dispersión anti-Stokes e implica la transferencia de energía de la molécula al fotón dispersado, como consecuencia, el fotón dispersado tendrá mayor energía [24]. La conservación de la energía requiere que $\hbar(\omega_1 - \omega_2) = E_f - E_i \equiv \hbar\omega_{fi}$, que es la diferencia de energía entre los estados final e inicial. Las dispersiones Stokes y Anti-Stokes corresponden a $\hbar\omega_{fi} > 0$ y $\hbar\omega_{fi} < 0$ respectivamente.

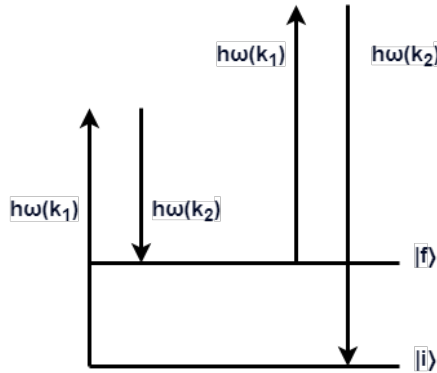


Figura 2.7: Dibujo esquemático que muestra la transición Stokes ($\omega_2 < \omega_1$) desde el estado inicial $|i\rangle$ a un estado excitado $|f\rangle$, y la transición Anti-Stokes ($\omega_2 > \omega_1$) desde $|f\rangle$ a $|i\rangle$

Desde el punto de vista de la generación de las ondas Stokes y Anti Stokes, el esparsamiento Raman puede dividirse en: Esparsamiento Raman Espontáneo y Esparsamiento Raman Estimulado. Estos procesos toman un rol fundamental en las comunicaciones ópticas, debido a que están implicados en la amplificación de señales y en la generación de ruido.

2.3.1 Esparsamiento Raman Espontáneo

Se denomina Esparsamiento Raman Espontáneo cuando esto ocurre de forma natural. Es importante destacar que los fotones (tanto por Stokes y Anti-Stokes) emitidos

espontáneamente poseen fase y polarización aleatoria, siendo la mayor fuente de ruido en la amplificación Raman, por la generación de Emisión Espontánea Amplificada (ASE : Amplified Stimulated Emission)

2.3.2 Esparcimiento Raman Estimulado

La dispersión Raman estimulada (SRS) ocurre cuando un fotón de la señal entra en un medio óptico no lineal junto con un fotón de bombeo de mayor frecuencia. El fotón de la señal estimula la emisión de un segundo fotón de la señal, que se obtiene desplazando Stokes al fotón de bombeo, de manera que su frecuencia y momento coincide exactamente con la del fotón de la señal de entrada.

Gracias a este proceso, es posible convertir cualquier fibra óptica en un amplificador óptico, ya que se produce un intercambio de energía de una onda de mayor frecuencia (bombeo) a otra de menor frecuencia (señal). Además, SRS puede ocurrir tanto en las direcciones hacia adelante como hacia atrás en las fibras ópticas.

2.4 Amplificación Raman

La amplificación Raman ha demostrado ser una tecnología habilitante para la implementación de sistemas de comunicación ópticos de gran capacidad.

2.4.1 Ganancia Raman y Ancho de Banda

El coeficiente de ganancia Raman $g_R(\Omega)$, donde $\Omega = \omega_p - \omega_s$ representa la diferencia de frecuencia entre las ondas de bombeo y de señal, es la cantidad más importante para describir SRS. En general, g_R depende de la composición del núcleo de la fibra y puede variar significativamente con el uso de diferentes dopantes. A su vez, depende que si el bombeo y las ondas de señal están copolarizadas o polarizadas ortogonalmente, como se observa en la figura 2.8.

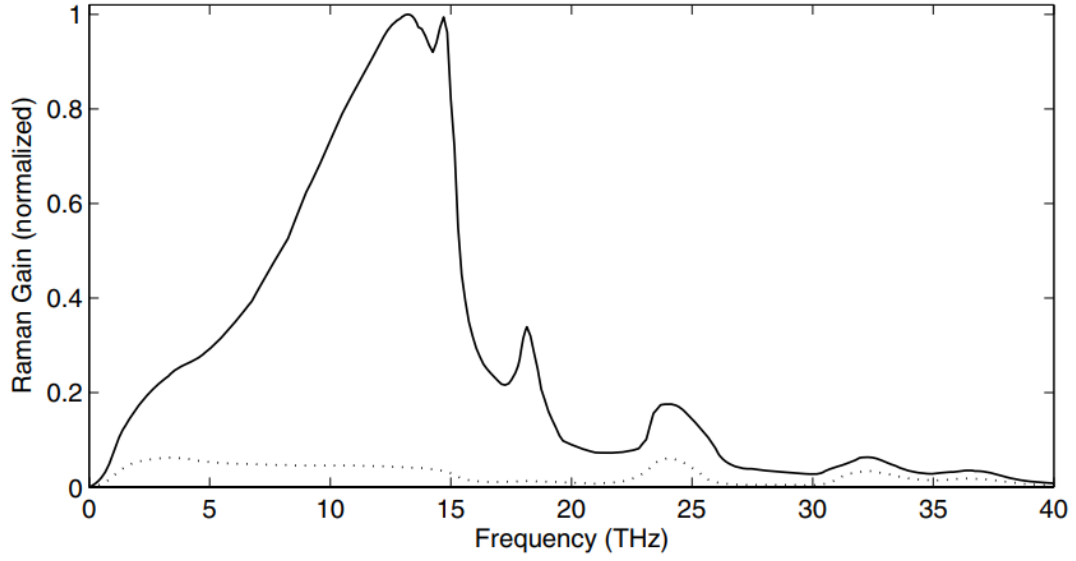


Figura 2.8: Coeficiente Raman normalizado para sílice fundida cuando las ondas de bombeo y señal están copolarizadas (línea). La curva de puntos muestra la situación en la que las ondas de bombeo y señal están polarizadas ortogonalmente.

2.4.2 Amplificadores Ópticos Raman Distribuidos

Como la interacción Stokes/Anti-Stokes sólo depende de la diferencia entre energía, es posible enviar el bombeo tanto co-propagante (forward pump), contra-propagante (backward pump) y una mezcla de ambos llamado bi-direccional. Es importante destacar que cada método entregará distintos valores en las métricas del amplificador, por tanto, es importante tener en cuenta cada una de ellas al momento de decidir como propagar el bombeo [25].

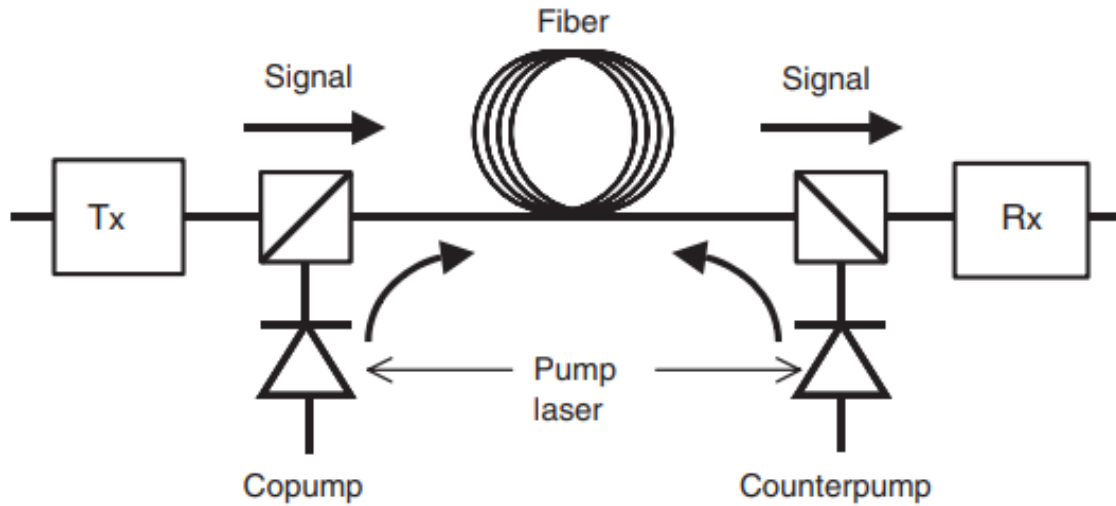


Figura 2.9: Esquema de un sistema de comunicación óptica que utiliza amplificación Raman

La figura de ruido (NF) de un amplificador es la conexión entre la relación señal-ruido (SNR) de la señal de entrada y la SNR de la señal de salida. Es una medida de cuanto degrada el amplificador la señal.

Tal como se comentó en la introducción, un amplificador Raman es distribuido ya que la amplificación se distribuye en la extensión de la fibra. Esto significa que la señal se ve amplificada gradualmente a lo largo de la propagación, evitando que ocurra una pérdida significativa (se degrade) antes de ser amplificada. En consecuencia, la SNR de la señal se mantiene relativamente alta. Al minimizar la degradación de SNR usando amplificación distribuida, la figura de ruido del sistema es más baja.

En un sistema de telecomunicaciones con múltiples longitudes de onda (WDM), es importante que todas las longitudes de onda de la señal tengan potencias ópticas similares. La diferencia en la ganancia entre diferentes longitudes de onda después de pasar por un amplificador se denomina ganancia espectral diferencial (DSG Differential Spectral Gain) y el sistema estará limitado por el canal con la menor ganancia.

En la amplificación Raman, se puede obtener un perfil de ganancia plano utilizando múltiples longitudes de onda de bombeo. Para cualquier fibra, el coeficiente ganancia Raman depende únicamente de la longitud de onda del bombeo, donde la ganancia es proporcional a la potencia de bombeo y la forma de la curva de ganancia es independiente de la longitud de onda del bombeo. Por tanto, si se utiliza más de un bombeo, se puede obtener un perfil de ganancia plano.

2.4.3 Múltiples Bombeos en la Amplificación Raman

La idea básica detrás de los amplificadores Raman con múltiples bombeos, es utilizar la propiedad de que el coeficiente de ganancia Raman existe en cualquier longitud de onda, siempre y cuando que la longitud de onda de la bomba se elija adecuadamente. Así, aunque el peak del espectro de ganancia para una sola bomba no es muy ancho y es plano solo en unos pocos nanómetros (ver Figura 2.8), la ganancia se puede ampliar y aplanar considerablemente utilizando varias bombas de diferentes longitudes de onda. Cada bomba crea una ganancia que imita el espectro mostrado, y la superposición de varios de estos espectros puede crear una ganancia relativamente plana en una amplia región espectral cuando se eligen cuidadosamente las longitudes de onda y los niveles de potencia de las bombas, tal como se puede observar en la figura 2.10.

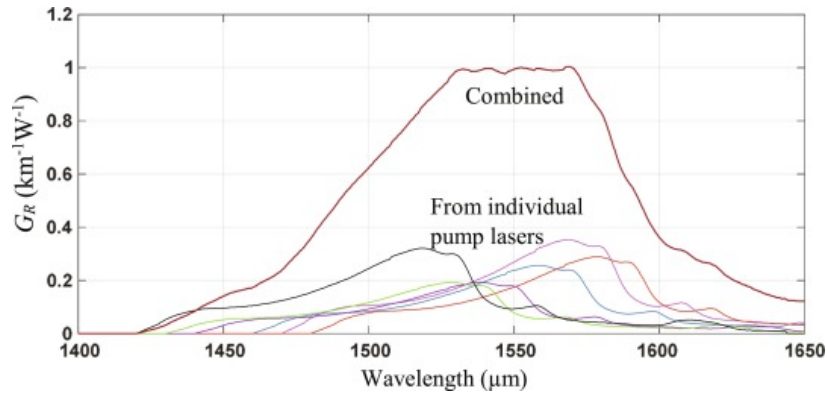


Figura 2.10: Ejemplo del coeficiente de ganancia Raman con la combinación de 6 diferentes longitudes de onda y niveles de potencia de bombeo[4].

2.5 Análisis del Ruido en Amplificadores Raman

El ruido es una limitación fundamental para la realización de enlaces de comunicación óptica de larga distancia punto a punto y redes ópticas. Además, el ruido que acompaña a una señal amplificada ópticamente desempeña un papel importante en la comprensión de las propiedades básicas del medio de ganancia y, al mismo tiempo, es de importancia práctica, ya que determina la capacidad de detección de la señal. Este ruido incluye la transferencia de ruido de la bomba y la figura de ruido [26].

2.5.1 Emisión Espontánea Amplificada (ASE)

El esparcimiento Raman espontáneo se suma a la señal amplificada y aparece como ruido debido a las fases aleatorias asociadas con todos los fotones generados. Este

mecanismo depende de la población de fonones en el estado vibracional, la cual, a su vez, depende de la temperatura del amplificador Raman [27]. Dicha amplificación genera la emisión espontánea amplificada (ASE), degradando y limitando la señal para largas distancias.

2.5.2 Figura de Ruido (NF)

La NF de un amplificador óptico cuantifica cuánto se degrada la relación señal a ruido (SNR) de la señal al ser amplificada.

$$NF = \frac{SNR_{IN}}{SNR_{OUT}} \quad (2.5)$$

Donde:

- SNR_{IN} es la relación señal a ruido antes de la amplificación, definida como el cociente entre la potencia de la señal de entrada y la potencia del ruido presente en esa etapa.
- SNR_{OUT} es la relación señal a ruido después de la amplificación, correspondiente al cociente entre la potencia de la señal amplificada y la potencia total del ruido a la salida del amplificador. Esta incluye tanto el ruido amplificado como el ruido adicional generado por el propio dispositivo.

Una figura de ruido baja indica que el amplificador introduce poco ruido adicional, manteniendo una degradación mínima en la relación señal a ruido.

En el caso de los amplificadores ópticos, se asume que la señal de entrada está lo más libre de ruido posible y, por lo tanto, solo se ve degradada por el ruido de disparo (shot noise) derivado de la naturaleza fundamental de partícula de la luz. Esta suposición garantiza que la NF tenga la máxima sensibilidad al ruido añadido por el amplificador. Además, se asume que la NF se mide utilizando un foto detector ideal con una eficiencia cuántica del 100%.

Para el cálculo de NF donde el ruido dominante es añadido debido a un amplificador óptico, se puede aproximar el cálculo de NF de la siguiente expresión.

$$NF \simeq \frac{2P_A^+(L)}{h\nu B_{ref} G_{net}} + \frac{1}{G_{net}} \quad (2.6)$$

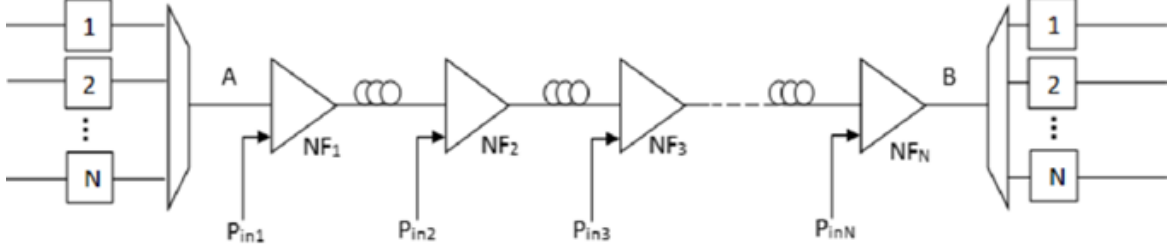


Figura 2.11: Cascada de amplificadores en serie

Donde, $P_A^+(L)$ es la potencia del ruido ASE en dirección forward al final de la fibra en un ancho de banda B_{ref} , h es la constante de Planck, v es la frecuencia del fotón y G_{net} es la ganancia neta.

Si se conectan varios amplificadores en cascada, la figura de ruido total de la cadena de amplificadores se expresa como:

$$NF_{total} = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots \quad (2.7)$$

donde NF_i y G_i son la figura de ruido y la ganancia neta (en unidades lineales) del i -ésimo amplificador en la cadena. Esto muestra que la figura de ruido total está dominada por la figura de ruido del primer amplificador, siempre que su ganancia sea suficientemente alta. Por este motivo, muchos amplificadores ópticos (y también eléctricos) de alto rendimiento emplean una configuración de múltiples etapas, con una primera etapa de baja figura de ruido y alta ganancia, denominada etapa preamplificadora (*preamplifier stage*).

En la Figura 2.11 se puede observar una serie de amplificadores en serie.

2.5.3 Figura de Ruido de un Amplificador Raman Distribuido

El concepto de preamplificación es crucial para comprender las mejoras en el rendimiento del sistema que se obtienen de la amplificación Raman distribuida. Como ejemplo, consideremos un tramo de fibra de 100 km de longitud, que introduce 20 dB de pérdida de señal. Sin bombeo Raman, se genera una cantidad despreciable de ASE dentro del tramo de fibra y, por lo tanto, la OSNR (SNR en el dominio óptico) no se ve degradada. En consecuencia, la ecuación 2.6 muestra que la NF del tramo no bombeado es igual al segundo término $1/G$, que en dB corresponde exactamente a la pérdida de 20 dB del tramo. Si luego del tramo se coloca un amplificador discreto, la figura de ruido total para el conjunto de “tramo + amplificador” puede calcularse usando la ecuación 2.7, donde el primer “amplificador” de la cadena es en realidad el propio tramo pasivo

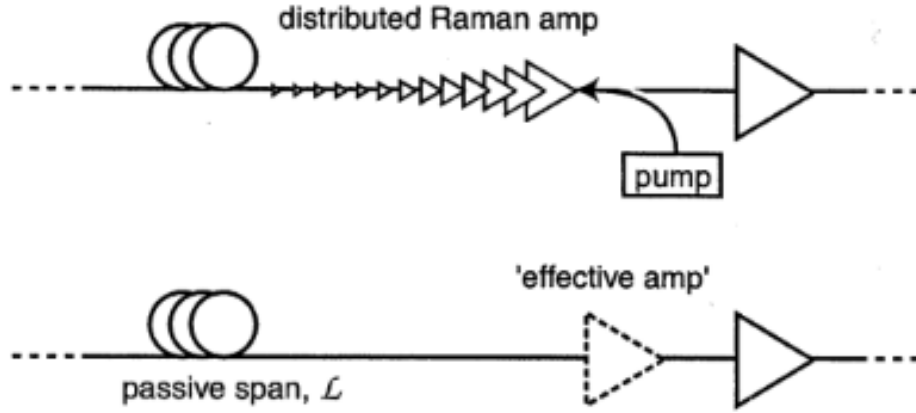


Figura 2.12: Sistema real y efectivo usando un amplificador discreto

como se observa en la Figura 2.12.

Por lo tanto, NF_{total} , en unidades lineales, corresponde a la pérdida del tramo multiplicada por la figura de ruido del amplificador discreto. En dB, si la figura de ruido de dicho amplificador discreto es de 5 dB, NF_{total} es de 25 dB.

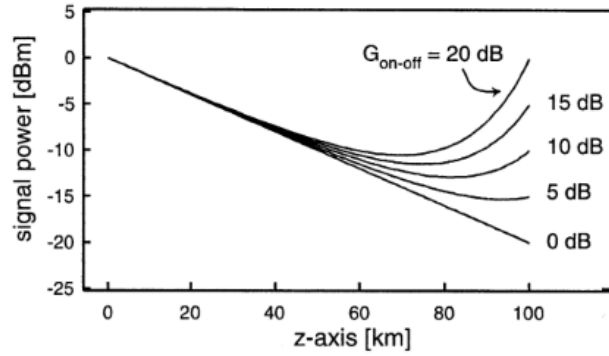


Figura 2.13: Evolución simulada de la potencia de la señal para diferentes valores de ganancia on-off.

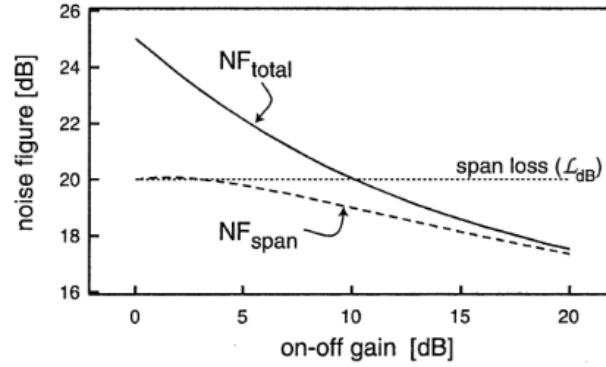


Figura 2.14: Valores simulados de NF en función de la ganancia on-off de Raman. La línea continua muestra la NF de un tramo de fibra contrapropagado con Raman, seguido de un amplificador discreto con NF de 5 dB. La línea discontinua muestra la NF del tramo de fibra bombeado por Raman por sí solo. La línea punteada indica la pérdida del tramo sin bombeo

Ahora bien, si se agrega bombeo Raman contrapropagante (backward), la potencia de la señal sigue trayectorias similares a las mostradas en la Fig. 2.13. Estas curvas simuladas, calculadas para ganancias on-off que van desde 0 dB (bombeo desactivado) hasta 20 dB (tramo transparente), muestran que el bombeo Raman convierte de manera efectiva los últimos 30 km de fibra en una etapa de preamplificación.

La mejora resultante en NF_{total} para el conjunto “tramo + amplificador discreto” se muestra en la Fig. 2.14. Al incrementar la ganancia encendido-apagado (on-off) de Raman de 0 a 20 dB, NF_{total} disminuye de 25 dB a 17.5 dB (línea continua). (Esta mejora está muy relacionada con el aumento de la potencia mínima de la señal en el tramo, aunque no son exactamente iguales, como a veces se asume). De hecho, con 20 dB de ganancia on-off, NF_{total} es tan solo 0.2 dB mayor que la figura de ruido del tramo de fibra bombeado por Raman, denotada NF_{span} (línea discontinua). Esto demuestra que una ganancia Raman alta “oculta” de manera efectiva la figura de ruido del amplificador discreto, tal como se predice en 2.7.

2.6 Figura de Ruido Efectiva

Esta mejora en la figura de ruido puede caracterizarse usando el concepto de una “figura de ruido efectiva” (Ver Fig. 2.15 para un diagrama conceptual). Dicha figura de ruido efectiva es aquella que requeriría un amplificador discreto ficticio, colocado después de un tramo sin bombeo, para obtener el mismo desempeño en cuanto al ruido que un amplificador Raman distribuido. Además, la ganancia del amplificador

efectivo debe ser igual a la ganancia on-off de Raman, de modo que actúe como un preamplificador equivalente para cualquier amplificador posterior.

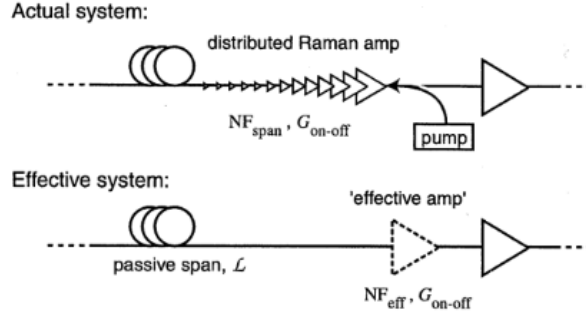


Figura 2.15: Sistema real y “efectivo” para bombeo contrapropagante Raman. Se muestra el preamplificador ficticio con ganancia $G_{\text{on-off}}$ y figura de ruido NF_{eff} , que se coloca después del tramo sin bombeo con una pérdida $\mathcal{L}$.

Una expresión para esta figura de ruido efectiva (NF_{eff}) puede obtenerse al igualar las figuras de ruido de las dos configuraciones mostradas en la Fig. 2.15. A partir de 2.7, se deduce que la figura de ruido del tramo de fibra bombeado por Raman (NF_{span}) debe cumplir:

$$NF_{\text{span}} = \mathcal{L} + \frac{NF_{\text{eff}} - 1}{1/\mathcal{L}} = \mathcal{L} \cdot NF_{\text{eff}}, \quad (2.8)$$

donde $\mathcal{L}$ representa la pérdida pasiva del tramo (en unidades lineales). Por lo tanto, en dB, la figura de ruido requerida por el amplificador efectivo es:

$$NF_{\text{eff}} = \frac{NF_{\text{span}}}{L} \quad (2.9)$$

Además si consideramos que:

$$G_{\text{net}} = \frac{P_{\text{out}}(\text{con bomba})}{P_{\text{in}}} \quad \text{y} \quad G_{\text{on-off}} = \frac{P_{\text{out}}(\text{con bomba})}{P_{\text{out}}(\text{sin bomba})}.$$

Si la fibra sin bomba introduce una pérdida L , entonces

$$P_{\text{out}}(\text{sin bomba}) = \frac{P_{\text{in}}}{L}.$$

Por lo tanto:

$$G_{\text{on-off}} = \frac{P_{\text{out}}(\text{con bomba})}{P_{\text{out}}(\text{sin bomba})} = \frac{P_{\text{out}}(\text{con bomba})}{P_{\text{in}}/L} = G_{\text{net}} \times L.$$

Podemos reescribir la ecuación 2.9 mediante 2.6 y obtener la siguiente relación para la figura de ruido efectiva.

$$NF_{\text{eff}} = \frac{1}{G_{\text{on-off}}} \left(1 + \frac{P_{\text{ASE}}}{E_{\text{ph}} B_{\text{ref}}} \right) \quad (2.10)$$

En los ejemplos mostrados en la Fig. 2.14, NF_{span} es menor que L_{dB} , y por consiguiente NF_{eff} es negativa en dB. Esto no significa que la SNR a la salida de un amplificador Raman sea mayor que a la entrada (lo cual no es físicamente posible). De hecho, la figura de ruido limitada por principios cuánticos para un amplificador óptico de alta ganancia es de 3 dB.

Por tanto, el hecho de que un amplificador efectivo ficticio deba tener una figura de ruido negativa pone de manifiesto que es imposible para un amplificador discreto ofrecer el mismo desempeño en cuanto al ruido de batido señal-espontáneo que un amplificador Raman distribuido.

La figura de ruido efectiva se define claramente y resulta fácil de interpretar cuando únicamente se emplea bombeo contrapropagante. Sin embargo, tal interpretación no es tan sencilla para el bombeo copropagante, dado que la ganancia se produce en el extremo opuesto del tramo respecto al amplificador efectivo ficticio.

2.7 Ecuación de Propagación en Fibras Monomodo (SMF)

En los temas anteriores se trataron todos los temas que influyen en la propagación de una fibra óptica monomodo, estos temas son atenuación, ganancia Raman y ruido ASE.

Considerando un amplificador Raman Monomodo, con potencias de bombeo $P^{p\pm}$ para cualquier tipo de configuración (forward, backward bidireccional) y potencias de señal P^s propagándose a través de la fibra en dirección +z[27]

- Atenuación

$$\frac{dP_v^s}{dz} = -\alpha_s(\lambda_v)P_v^s \quad (2.11)$$

$$\pm \frac{dP_\mu^{p\pm}}{dz} = -\alpha_\mu(\lambda_\mu)P_\mu^{p\pm} \quad (2.12)$$

Donde:

- P_v^s es la potencia del canal de señal v .
- $P_\mu^{p\pm}$ es la potencia de bombeo μ en dirección $\pm$.
- $\alpha_s(\lambda_v)$ es el coeficiente de atenuación para la señal a la longitud de onda λ_v .
- $\alpha_\mu(\lambda_\mu)$ es el coeficiente de atenuación para el bombeo a la longitud de onda λ_μ .

- Ganancia Raman

En sistemas WDM, la ganancia Raman se describe mediante las siguientes ecuaciones acopladas que tienen en cuenta la interacción entre múltiples canales de bombeo y señales[27]:

$$\frac{dP_v^s}{dz} = \sum_{\mu} g_R(\lambda_v, \lambda_\mu) P_\mu^{p\pm} P_v^s \quad (2.13)$$

$$\frac{dP_\mu^{p\pm}}{dz} = - \sum_v \frac{\lambda_v}{\lambda_\mu} g_R(\lambda_\mu, \lambda_v) P_v^s P_\mu^{p\pm} \quad (2.14)$$

Donde:

- P_v^s es la potencia del canal de señal v .
- $P_\mu^{p\pm}(z)$ es la potencia de bombeo μ en dirección $\pm$.
- $g_R(\lambda_v, \lambda_\mu)$ es el coeficiente de ganancia Raman entre la señal v y el bombeo μ .
- La suma sobre μ en la ecuación (2.13) representa la contribución de múltiples bombesos a la ganancia de la señal v .
- La suma sobre v en la ecuación (2.14) representa la depletación de la potencia de bombeo μ debido a su interacción con todas las señales v .

- Ruido ASE

El ruido ASE se modela de la siguiente forma[27]:

$$\frac{dP_v^s}{dz} = h\nu g_R(\lambda_\mu, \lambda_v) P_\mu^{p\pm} \cdot \left[1 + \frac{1}{e^{h(\mu-\nu)/kT} - 1} \right] \Delta\nu \quad (2.15)$$

$$\frac{dP_\mu^p}{dz} = -2h\mu g_R(\lambda_\mu, \lambda_\mu^\nu) P_\nu \cdot \left[1 + \frac{1}{e^{h(\nu-\mu)/kT} - 1} \right] \Delta\mu \quad (2.16)$$

Donde:

- P_v^s es la potencia del canal de señal v .
- $P_\mu^{p\pm}$ es la potencia de bombeo μ en dirección $\pm$.
- h es la constante de Planck.
- ν y μ son las frecuencias de la señal y del bombeo, respectivamente.
- k es la constante de Boltzmann.
- T es la temperatura absoluta de la fibra.
- $g_R(\lambda_\mu, \lambda_v)$ es el coeficiente de ganancia Raman entre la señal v y el bombeo μ .
- $\Delta\nu$ y $\Delta\mu$ representan los anchos de banda efectivos en las frecuencias ν y μ , respectivamente.
- El término $\left[1 + \frac{1}{e^{h(\mu-\nu)/kT} - 1}\right]$ representa la ocupación de estados en función de la temperatura y describe el efecto de la distribución de energía en los modos de ruido.

Enlazando las ecuaciones anteriormente descritas, se tiene que

$$\frac{dP_v^s}{dz} = -\alpha_s(\lambda_v)P_v^s + \sum_{\mu} g_R(\lambda_v, \lambda_\mu)P_\mu^{p\pm}P_v^s + h\nu g_R(\lambda_\mu, \lambda_v)P_\mu^{p\pm} \cdot \left[1 + \frac{1}{e^{h(\mu-\nu)/kT} - 1}\right] \Delta\nu \quad (2.17)$$

$$\frac{dP_\mu^{p\pm}}{dz} = -\alpha_\mu(\lambda_\mu)P_\mu^{p\pm} - \sum_v \frac{\lambda_v}{\lambda_\mu} g_R(\lambda_\mu, \lambda_v)P_v^s P_\mu^{p\pm} - 2h\mu g_R(\lambda_\mu, \lambda_\mu^\nu)P_\nu \cdot \left[1 + \frac{1}{e^{h(\nu-\mu)/kT} - 1}\right] \Delta\mu \quad (2.18)$$

En las ecuaciones 2.17 y 2.18 se tiene el comportamiento de un amplificador Raman de primer orden, tanto para la señal como para el bombeo. Ahora bien, existe la alternativa de tener bombeos a una larga distancia (cercana a los 100 nm), haciendo que haya una interacción bombeo-bombeo, debido a que se está aplicando las condiciones de bombeo de baja longitud de onda a un bombeo de mayor longitud de onda, añadiendo más términos. Dicha ecuación es descrita y expandida a continuación[28]:

$$\begin{aligned}
\frac{dP_s^\pm(\nu)}{dz} = & \mp \alpha(\nu) P_s^\pm(\nu) \\
& \pm \sum_{\mu > \nu} \left\{ g_R(\lambda_\nu - \lambda_\mu) \cdot [P_s^\pm(\mu) + P_s^\mp(\mu)] \cdot P_s^\pm(\nu) \right. \\
& \quad \left. + h\nu g_R(\lambda_\nu - \lambda_\mu) \cdot [P_s^\pm(\mu) + P_s^\mp(\mu)] \cdot \left[1 + \frac{1}{e^{h(\mu-\nu)/kT} - 1} \right] \Delta\nu \right\} \\
& \mp \sum_{\mu < \nu} \left\{ g_R(\lambda_\nu - \lambda_\mu) [P_s^\pm(\mu) + P_s^\mp(\mu)] \cdot P_s^\pm(\nu) \right. \\
& \quad \left. + 2h\mu g_R(\lambda_\nu - \lambda_\mu) P_s^\pm(\nu) \cdot \left[1 + \frac{1}{e^{h(\nu-\mu)/kT} - 1} \right] \Delta\mu \right\} \quad (2.19)
\end{aligned}$$

En la ecuación 2.19 se demuestra la evolución de potencia hacia delante y atrás de las bombas, señales y ASE [29], dichas potencias son fundamentales para modelar y analizar el comportamiento de un amplificador Raman.

2.8 Propagación en Fibras Multimodo

Como se discutió anteriormente, en una fibra óptica es posible que se propague más de un modo, logrando así un mayor número de canales enviados en la fibra óptica. Una ventaja en la multiplexación de modos comparada a la multiplexación usando rutas de transmisión que no se superponen (cinta de fibras) es la fuerte superposición de intensidades de los canales multiplexados, que permite compartir un único bombeo a través de múltiples modos de señal, de manera similar a un amplificador WDM donde una sola bomba comparte múltiples canales WDM [30]. Dentro de los desafíos de este tipo de amplificación está el DMG, donde los modos guiados están sujetos a distinta atenuación y amplificación [31].

2.8.1 Análisis de la Propagación en Múltiples Modos

Al tener múltiples modos propagándose en una fibra óptica, se generará solapamiento entre modos, esta interacción esta compuesta por la siguiente variable y se describe[2]:

$$f_{m,n} = \frac{\int \int_{-\infty}^{+\infty} I_m(x, y) I_n(x, y) dx dy}{\int \int_{-\infty}^{+\infty} I_m(x, y) dx dy \int \int_{-\infty}^{+\infty} I_n(x, y) dx dy} \quad (2.20)$$

Donde:

$I_n(x, y)$ representa el perfil del modo n en la posición (x, y) .

La diferencia en $f_{m,n}$ para diferentes modos causará DMG, que puede ser minimizado mediante el control de la potencia de bombeo modal.

2.8.2 Ecuación de Propagación en Fibras Multimodo (FMF)

Teniendo en consideración 2.19 y 2.20, se puede derivar la siguiente ecuación 2.21 [2, 32], dicha ecuación modela la evolución de potencia hacia delante y hacia atrás de las señales, bombeo y ASE.

Teniendo (n, m) modos de bombeo y de señal, con (v, μ) longitudes de onda de bombeo y de señal.

$$\begin{aligned}
\frac{dP_{v,m}^{\pm}}{dz} = & \mp \alpha_{v,m} P_{v,m}^{\pm} \pm P_{v,m}^{\pm} \sum_{\mu > v} \sum_n \frac{g_{\mu,v}}{\Gamma} f_{m,n} (P_{\mu,n}^+ + P_{\mu,n}^-) \\
& \pm hv \sum_{\mu > v} \sum_n g_{\mu,v} f_{m,n} (P_{\mu,n}^+ + P_{\mu,n}^-) \left[1 + (e^{h(\mu-v)/kT} - 1)^{-1} \right] \Delta v \\
& \mp P_{v,m}^{\pm} \sum_{\mu < v} \sum_n \frac{v}{\mu} \frac{g_{\mu,v}}{\Gamma} f_{m,n} (P_{\mu,n}^+ + P_{\mu,n}^-) \\
& \mp P_{v,m}^{\pm} \sum_{\mu < v} \sum_n \frac{v}{\mu} g_{\mu,v} f_{m,n} 2h\mu \left[1 + (e^{h(v-\mu)/kT} - 1)^{-1} \right] \Delta \mu \quad (2.21)
\end{aligned}$$

Donde:

Los símbolos $+$ y $-$ denotan la dirección de propagación, $P_{v,m}(P_{v,n}, P_{\mu,n})$ es la potencia óptica a la frecuencia $v(v, \mu)$ en el modo $m(n, n)$, $\alpha_{v,m}$ es el coeficiente de atenuación a la frecuencia v para el modo m , $g_{\mu,v}$ es el coeficiente Raman entre la diferencia de frecuencias μ y v , $f_{m,n}$ es la integral de solapamiento de intensidad entre los modos m y n , Δv y $\Delta \mu$ representa el ancho de banda efectivo a las frecuencias v y μ , respectivamente, Γ es el valor de polarización entre el bombeo y la señal (en este caso es 2), h es la constante de Planck, k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura absoluta de la fibra en grados Kelvin.

2.9 Bombeo de segundo orden

En este esquema, se utiliza un bombeo de segundo orden a 1360 nm, el cual no solo amplifica al bombeo de primer orden a 1455 nm, sino que también proporciona ganancia directa en longitudes de onda cercanas a 1530 nm. Esto se debe a que

la dispersión Raman presenta un pico en torno a los 27.5 THz, lo que permite que el bombeo de 1360 nm contribuya directamente a la amplificación de señales en esa región espectral. Como resultado, se obtiene un espectro de ganancia más amplio y mejor distribuido a lo largo de la banda C[2].

Esto provoca una amplificación a lo largo de la fibra, lo que mantiene una SNR más alta.

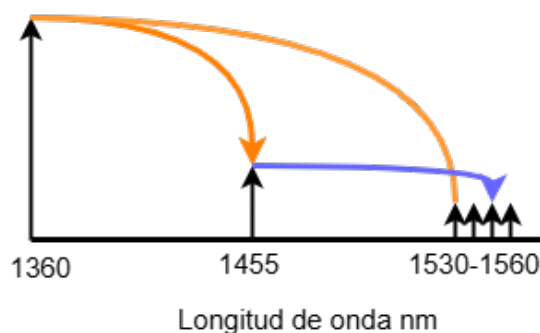


Figura 2.16: Representación de bombeo de segundo orden

Se ha demostrado que existen importantes beneficios al trasladar la ganancia desde el extremo de un tramo de fibra a lo largo de ella, como por ejemplo una OSNR mejorada [25].

Un ejemplo de como evoluciona la potencia en comparación a usar segundo o primer orden es presentado en la Figura 2.17. Donde se observa que la potencia en segundo orden es mayor al primer orden a lo largo de la fibra (si la ganancia es la misma, el valor final será el mismo).

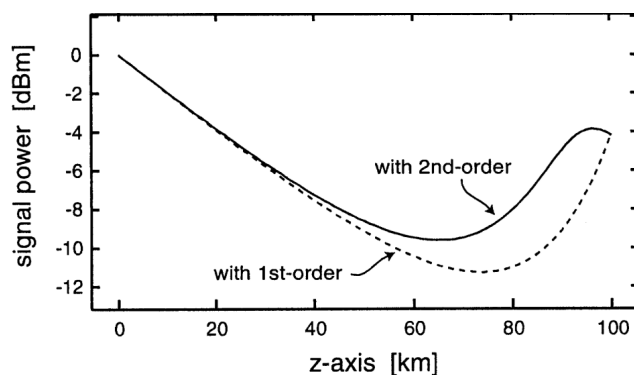


Figura 2.17: Comparativa de uso bombeo de segundo orden (línea continua) y primer orden (línea segmentada)[5]

En resumen, el uso de bombeo Raman de segundo orden permite distribuir la ganancia a lo largo de toda la fibra en lugar de concentrarla únicamente hacia el final

del tramo. Esta distribución más homogénea de la ganancia reduce la acumulación de ruido ASE en la etapa previa al amplificador final, lo que se traduce en una mayor OSNR. Al mantener una mayor potencia de señal a lo largo de la fibra, se mejora la preamplificación y se atenúan los efectos del ruido acumulado, resultando en un rendimiento superior en enlaces de larga distancia o en sistemas que requieren alta sensibilidad.

2.10 Algoritmo Genético

El Algoritmo Genético clásico se basa en un conjunto de soluciones candidatas que representan una solución al problema de optimización que queremos resolver. Una solución es una candidata potencial para un óptimo del problema de optimización. Este Algoritmo está basado en los procesos de evolución natural, como la selección, cruzamiento y mutación [33].

1. Inicialización de la población

- Se genera una población inicial de forma aleatoria, donde cada individuo representa una solución potencial al problema.
- La diversidad inicial es clave para explorar diferentes regiones del espacio de soluciones.

2. Evaluación de la Aptitud (Fitness):

- Cada individuo es evaluado mediante una función objetivo, que cuantifica qué tan buena es la solución que representa.
- La aptitud refleja la calidad de las soluciones.

3. Selección de Individuos:

- Se seleccionan individuos de la población actual para ser padres de la siguiente generación.

4. Operadores Genéticos:

- Crossover:
 - Combina la información de dos padres para producir uno o más hijos.
 - Promueve la exploración de nuevas soluciones al mezclar características de soluciones existentes.

- Mutación:
 - Introduce cambios aleatorios en un individuo.
 - Aumenta la diversidad genética y ayuda a evitar la convergencia prematura en óptimos locales.

5. Mapeo del fenotipo:

- Transforma el genotipo (representación interna de la solución) en un fenotipo (solución en términos del problema real).
- En este trabajo, el genotipo consiste en los parámetros codificados (potencia y longitud de onda de bombeo), y el fenotipo es su interpretación física para ser evaluada.

6. Actualización de la Población:

- La nueva generación de individuos reemplaza total o parcialmente a la población anterior.

Para la optimización en la búsqueda de minimizar las variables de interés (DMG, DSG, ganancia mínima, etc.), se utilizará el conjunto de ecuaciones del algoritmo genético de MATLAB ®.

2.11 Resumen

En este capítulo se ha presentado un análisis detallado de los fundamentos teóricos y modelos matemáticos relacionados con la propagación de la luz en fibras ópticas y la amplificación Raman. Se revisó la teoría básica de la propagación por teoría de rayos y los modos de propagación en fibras ópticas, así como los mecanismos de atenuación que afectan la transmisión de señales ópticas.

Se abordó el fenómeno del esparcimiento Raman en fibras ópticas, distinguiendo entre el esparcimiento Raman espontáneo y estimulado, y su papel fundamental en la amplificación de señales ópticas. Además, se exploró en profundidad la amplificación Raman, incluyendo el concepto de ganancia Raman y ancho de banda, y la implementación de amplificadores Raman distribuidos. Se hizo hincapié en el uso de múltiples bombeos para lograr un perfil de ganancia plano en sistemas WDM y en las ventajas del bombeo de segundo orden para mejorar la eficiencia y reducir el ruido.

Se analizó el ruido en amplificadores Raman, particularmente la emisión espontánea amplificada (ASE) y su influencia en la figura de ruido (NF) del amplificador.

También se presentaron las ecuaciones de propagación en fibras monomodo (SMF), incluyendo los efectos de atenuación, ganancia Raman y ruido ASE, proporcionando un modelo completo para describir la evolución de las potencias de señal y bombeo a lo largo de la fibra.

Asimismo, se extendió el análisis a las fibras multimodo, considerando la interacción entre modos y su impacto en la amplificación Raman. Se discutió el solapamiento modal y cómo éste influye en la diferencia de ganancia entre modos (DMG), así como las estrategias para minimizar este efecto mediante el control de la potencia de bombeo modal.

Finalmente, se introdujo el algoritmo genético como herramienta de optimización para ajustar los parámetros del sistema y minimizar variables de interés como el DMG y la planitud de la ganancia. Se destacó la importancia de esta técnica en la búsqueda de soluciones óptimas para sistemas complejos de comunicaciones ópticas.

Los modelos y conceptos presentados en este capítulo proporcionan una base sólida para el diseño y análisis de sistemas de comunicaciones ópticas avanzados. La comprensión detallada de los mecanismos de propagación, amplificación y ruido en fibras ópticas es fundamental para el desarrollo de soluciones eficientes y de alto rendimiento en el ámbito de las telecomunicaciones ópticas. Estos fundamentos teóricos serán esenciales en los capítulos posteriores, donde se aplicarán para la optimización y mejora de sistemas de amplificación Raman en fibras ópticas.

Capítulo 3

Diseño y Optimización de FM-DFRA

3.1 Introducción

El diseño y optimización de sistemas FM-DFRA presenta desafíos significativos, principalmente debido a la naturaleza no lineal de las ecuaciones que describen la propagación de la potencia óptica en la fibra. Estas ecuaciones, que incluyen efectos como la ganancia Raman, la atenuación y la interacción entre modos, no pueden resolverse analíticamente, lo que obliga a recurrir a métodos numéricos para su aproximación. En este capítulo, se aborda el diseño y optimización de un sistema DFRA mediante el uso de técnicas numéricas y algoritmos genéticos, con el objetivo de minimizar las diferencias de ganancia entre modos (DMG) y las variaciones espectrales de ganancia (DSG), garantizando así un desempeño óptimo del sistema.

3.2 Resolución a partir de Análisis Numérico

La ecuación 2.21 que describe la evolución de las potencias propagadas es un sistema no-lineal de ecuaciones diferenciales acopladas (la ecuación incluye términos no lineales y la solución de una ecuación depende de las soluciones de otras). Dado a su inherente dificultad, esta ecuación no puede resolverse analíticamente. Debido a esta dificultad, se optó por utilizar métodos numéricos. Se utilizan métodos numéricos para encontrar una aproximación a la solución que describe la forma que posee en el espacio.

Existen múltiples métodos para resolver este tipo de ecuaciones, tal como el método de Euler hacia adelante, Runge-Kutta de orden 4, etc. Cada método tiene sus ventajas y desventajas en términos de eficiencia computacional, precisión, estabilidad y convergencia. Por ejemplo, el método de Euler es más simple de implementar pero menos preciso, mientras que Runge-Kutta de orden 4 ofrece mayor precisión a costa de un mayor costo computacional[34].

Se decidió utilizar el método de Euler debido a su simplicidad de implementación. Sin embargo, fue necesario considerar el tiempo de ejecución, el cual, aunque elevado, resultó razonable para los fines del estudio. Para garantizar la consistencia y estabilidad del método, se optó por un tamaño de paso cercano a 0, lo que minimiza el error de truncamiento y asegura resultados confiables en sistemas no lineales.

3.2.1 Implementación del modelo mediante método de Euler

El sistema de ecuaciones de forma simplificada para la propagación en múltiples modos y frecuencias considerando una división en la fibra con l segmentos, se expresa como:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_{\nu_1, m_1}^{\pm}}{\partial z} &= f_{\nu_1, 1} \left(z, P_{\nu_1, m_1}^{\pm}, P_{\nu_1, m_2}^{\pm}, \dots, P_{\nu_1, m_M}^{\pm}, P_{\nu_2, m_1}^{\pm}, P_{\nu_2, m_2}^{\pm}, \dots, P_{\nu_N, m_M}^{\pm} \right) \\
\frac{\partial P_{\nu_1, m_2}^{\pm}}{\partial z} &= f_{\nu_1, 2} \left(z, P_{\nu_1, m_1}^{\pm}, P_{\nu_1, m_2}^{\pm}, \dots, P_{\nu_1, m_M}^{\pm}, P_{\nu_2, m_1}^{\pm}, P_{\nu_2, m_2}^{\pm}, \dots, P_{\nu_N, m_M}^{\pm} \right) \\
&\vdots \\
\frac{\partial P_{\nu_1, m_M}^{\pm}}{\partial z} &= f_{\nu_1, M} \left(z, P_{\nu_1, m_1}^{\pm}, P_{\nu_1, m_2}^{\pm}, \dots, P_{\nu_1, m_M}^{\pm}, P_{\nu_2, m_1}^{\pm}, P_{\nu_2, m_2}^{\pm}, \dots, P_{\nu_N, m_M}^{\pm} \right) \\
&\vdots \\
\frac{\partial P_{\nu_2, m_1}^{\pm}}{\partial z} &= f_{\nu_2, 1} \left(z, P_{\nu_1, m_1}^{\pm}, P_{\nu_1, m_2}^{\pm}, \dots, P_{\nu_1, m_M}^{\pm}, P_{\nu_2, m_1}^{\pm}, P_{\nu_2, m_2}^{\pm}, \dots, P_{\nu_N, m_M}^{\pm} \right) \\
&\vdots \\
\frac{\partial P_{\nu_N, m_M}^{\pm}}{\partial z} &= f_{\nu_N, M} \left(z, P_{\nu_1, m_1}^{\pm}, P_{\nu_1, m_2}^{\pm}, \dots, P_{\nu_1, m_M}^{\pm}, P_{\nu_2, m_1}^{\pm}, P_{\nu_2, m_2}^{\pm}, \dots, P_{\nu_N, m_M}^{\pm} \right)
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Donde los índices $+$ y $-$ denotan la dirección de propagación de la señal con longitud de onda ν_N y modo m_M respectivamente y la función f para una longitud de onda j y modo m se define como:

$$\begin{aligned}
f_{\nu_j, m_m} \left(z, P_{\nu_1, m_1}^{\pm}, \dots, P_{\nu_1, m_M}^{\pm}, \dots, P_{\nu_j, m_m}^{\pm}, \dots, P_{\nu_i, m_M}^{\pm} \right) &= \mp \alpha_{\nu_j, m_m} \\
\pm P_{\nu_j, m_m}^{\pm} \sum_{\nu_i > \nu_j} \sum_{m_n} \frac{g_{\nu_i, \nu_j}}{\Gamma} f_{m_m, m_n} (P_{\nu_i, m_n}^+ + P_{\nu_i, m_n}^-) \\
\pm h\nu \sum_{\nu_i > \nu_j} \sum_{m_n} g_{\nu_i, \nu_j} f_{m_m, m_n} (P_{\nu_i, m_n}^+ + P_{\nu_i, m_n}^-) \left[1 + (e^{h(\nu_i - \nu_j)/kT} - 1)^{-1} \right] \Delta \nu_j \\
\mp P_{\nu_j, m_m}^{\pm} \sum_{\nu_i < \nu_j} \sum_n \frac{\nu_j}{\nu_i} \frac{g_{\nu_i, \nu_j}}{\Gamma} f_{m_m, m_n} (P_{\nu_i, m_n}^+ + P_{\nu_i, m_n}^-) \\
\mp P_{\nu_j, m_m}^{\pm} \sum_{\nu_i < \nu_j} \sum_n \frac{\nu_j}{\nu_i} g_{\nu_i, \nu_j} f_{m_m, m_n} 2h\nu_i \left[1 + (e^{h(\nu_j - \nu_i)/kT} - 1)^{-1} \right] \Delta \nu_i \quad (3.2)
\end{aligned}$$

cuando se resuelve el sistema desde $z = 0$ hacia $z = L$, y

$$\begin{aligned}
f_{\nu_j, m_m} \left(z, P_{\nu_1, m_1}^{\pm}, \dots, P_{\nu_1, m_M}^{\pm}, \dots, P_{\nu_j, m_m}^{\pm}, \dots, P_{\nu_i, m_M}^{\pm} \right) &= \pm \alpha_{\nu_j, m_m} \\
\mp P_{\nu_j, m_m}^{\pm} \sum_{\nu_i > \nu_j} \sum_{m_n} \frac{g_{\nu_i, \nu_j}}{\Gamma} f_{m_m, m_n} (P_{\nu_i, m_n}^+ + P_{\nu_i, m_n}^-) \\
\mp h\nu \sum_{\nu_i > \nu_j} \sum_{m_n} g_{\nu_i, \nu_j} f_{m_m, m_n} (P_{\nu_i, m_n}^+ + P_{\nu_i, m_n}^-) \left[1 + (e^{h(\nu_i - \nu_j)/kT} - 1)^{-1} \right] \Delta \nu_j \\
\pm P_{\nu_j, m_m}^{\pm} \sum_{\nu_i < \nu_j} \sum_n \frac{\nu_j}{\nu_i} \frac{g_{\nu_i, \nu_j}}{\Gamma} f_{m_m, m_n} (P_{\nu_i, m_n}^+ + P_{\nu_i, m_n}^-) \\
\pm P_{\nu_j, m_m}^{\pm} \sum_{\nu_i < \nu_j} \sum_n \frac{\nu_j}{\nu_i} g_{\nu_i, \nu_j} f_{m_m, m_n} 2h\nu_i \left[1 + (e^{h(\nu_j - \nu_i)/kT} - 1)^{-1} \right] \Delta \nu_i \quad (3.3)
\end{aligned}$$

cuando se resuelve el sistema desde $z = L$ hacia $z = 0$.

Por tanto, la solución para el sistema de ecuaciones utilizando el método de Euler es

$$P_{\nu_j, m_m}^{\pm(n+1)} = P_{\nu_j, m_m}^{\pm(n)} + \Delta z (f_{\nu_j, m_m})$$

donde, Δz es el paso requerido para cada iteración (en nuestro caso se escogió 0.04 km). Además los valores de las condiciones iniciales son conocidas ya que es la potencia inyectada a la fibra óptica.

$$\begin{aligned}
P_{v, m}^{+(0)} &= f_0(v, m) \quad \text{señales propagadas en sentido forward} \\
P_{v, m}^{-(L)} &= b_0(v, m) \quad \text{señales propagadas en sentido backward}
\end{aligned}$$

Al tener condiciones iniciales en ambos extremos de la fibra óptica, se presenta un desafío numérico que requiere un enfoque especializado para resolver las ecuaciones diferenciales asociadas. En este caso, se utilizará un método de relajación, explicado por Hernán Soto [1], debido a que también el método de Euler es empleado para problemas con condiciones iniciales en un solo punto. El método de relajación permite iterar y ajustar las soluciones hasta que se satisfagan las condiciones en ambos extremos de la fibra.

3.2.2 Método de Relajación [1]

El método de relajación se utiliza para encontrar solución numérica a problemas en los cuales las condiciones iniciales de las funciones buscadas se encuentran en tiempos y/o posiciones distintas. En nuestro caso al tener sólo bombeo backward se consideran 3 pasos.

Paso 1: Resolver el sistema de ecuaciones en sentido backward, considerando como incógnitas sólo las ondas que posean sus condiciones iniciales en $z=L$, en este caso las señales de bombeo backward.

Paso 2: Resolver el sistema de ecuaciones en sentido el sentido contrario propagándose sólo las ondas que posean condiciones iniciales en $z=0$, en este caso las señales y el ruido ASE. Gracias al paso 1, ahora se consideran los efectos producidos por las ondas de sentido contrario.

Paso 3: Resolver el sistema de ecuaciones en sentido backward, considerando como incógnitas sólo las ondas que posean sus condiciones iniciales en $z=L$, en este caso las señales de bombeo backward, pero esta vez se tendrá en consideración las ondas de sentido contrario a partir de lo obtenido en el paso 2.

Es necesario repetir los pasos 2 y 3 un número de veces, de tal manera que la solución obtenida en este punto no posea una diferencia porcentual mayor a cierto valor con respecto a la solución obtenida en la iteración anterior, valor que deberá cumplir algún criterio de convergencia.

3.2.3 Consideraciones Finales

En esta sección se hace referencia a todos los valores utilizados al momento de implementar el modelo de propagación.

La atenuación y los coeficientes de ganancia Raman fueron obtenidos a partir de los valores entregados en VPIphotonics ®correspondiente a una fibra SMF.

La atenuación está determinada para un rango de valores

$$800 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1630 \text{ nm}$$

De la misma forma, el coeficiente de ganancia Raman está determinada para una variación en frecuencia

$$0 \text{ THz} \leq \Delta\nu \leq 27 \text{ THz}$$

Este coeficiente de ganancia Raman fue obtenido a partir de un bombeo de 1455 nm, por lo cual, bajo la ecuación entregada en [35], es posible calcular la curva de ganancia Raman para el resto de longitudes de onda de bombeo.

$$g_R(\Delta\nu, \Lambda_p) = g_R(\Delta\nu, \lambda_p) \cdot \left(\frac{\lambda_s}{\Lambda_s} \right) \cdot \left[\frac{A_{\text{eff}}^{ps}(\Delta\nu, \lambda_p)}{A_{\text{eff}}^{ps}(\Delta\nu, \Lambda_p)} \right] \quad (3.4)$$

Donde, $\Delta\nu$ representa la separación de frecuencia entre el bombeo y la señal. Los valores (λ_s, λ_p) corresponden a los valores previos, mientras que (Λ_s, Λ_p) son los valores obtenidos.

El área efectiva se considera constante para cada modo y son calculados para cada modo. Por último se considera un coeficiente de polarización Γ igual a 2.

3.3 Optimización mediante Algoritmo Genético

En un algoritmo genético, la función objetivo es crucial para guiar la búsqueda de soluciones óptimas. En este caso, la función objetivo se construye a partir de dos penalizaciones principales: DSG y DMG.

- Penalización por DMG (Differential Modal Gain): Esta penalización se aplica cuando la diferencia de ganancia entre dos modos supera un umbral predefinido (por ejemplo, 0.1 dB). En el código, se calcula la diferencia de ganancia entre todos los pares de modos y se suma una penalización cuadrática si esta diferencia excede el umbral. Esto asegura que el algoritmo genético tienda a minimizar las diferencias de ganancia entre modos.
- Penalización por DSG (Differential Spectral Gain): Esta penalización se aplica cuando la variación de ganancia dentro de un mismo modo es demasiado alta

(por ejemplo, mayor a 0.2 dB). En el código, se calcula la variación de ganancia para cada modo y se suma una penalización cuadrática si esta variación supera el umbral. Esto garantiza que la ganancia dentro de cada modo sea lo más uniforme posible.

La función objetivo final es una combinación de estas penalizaciones donde se minimiza durante la ejecución del algoritmo genético, lo que lleva a soluciones que cumplen con los requisitos de DMG y DSG.

En la búsqueda de soluciones óptimas, es común definir límites inferiores y superiores para las variables que se están optimizando. Estos límites restringen el espacio de búsqueda, lo que puede mejorar la eficiencia del algoritmo y evitar soluciones no físicas o no deseadas.

Estos valores deben ser concordantes a lo que se está trabajando, en nuestro caso, buscamos amplificar la sección de banda C. Por tanto se debe tener en consideración un rango de valores que amplifiquen esta banda (tanto de longitud de onda como potencia de bombeo).

$$P_{\text{DMG}} = \sum_{i=1}^N [\max(0, \Delta G_i - \mu_1)]^2, \quad (3.5)$$

$$P_{\text{DSG}} = \sum_m \left[\max \left(0, \left(\max_i G_i^m - \min_i G_i^m \right) - \mu_2 \right) \right]^2, \quad (3.6)$$

$$f(\mathbf{x}) = \alpha \cdot P_{\text{DMG}} + \beta \cdot P_{\text{DSG}}. \quad (3.7)$$

Aquí, μ_i representa el umbral máximo aceptable de desviación de ganancia (establecido como una constante en la simulación), y tanto α como β son factores de ponderación que definen la importancia de cada componente en la función objetivo. El término ΔG_i corresponde a la variación de ganancia entre todos los modos de propagación en un canal WDM específico i , mientras que G_i^m denota la fluctuación de ganancia entre todos los canales WDM para un modo dado m . En este trabajo, se establece $\alpha = \beta$, otorgando igual importancia a la planitud modal y espectral. El uso de una formulación basada en el error cuadrático garantiza una penalización suave más allá del umbral y facilita la convergencia del proceso de optimización.

Se considera que se ha alcanzado la convergencia cuando los valores calculados de DMG y DSG caen por debajo de sus respectivos umbrales definidos por μ_i . Estos umbrales representan las desviaciones máximas aceptables en la ganancia modal y espectral. Si estas condiciones no se cumplen, el algoritmo genético continúa evolucionando.

nando la población hasta que la función objetivo satisfaga las restricciones deseadas o se alcance el número máximo de generaciones. Este criterio dual asegura que el proceso de optimización equilibre precisión con eficiencia computacional.

El procedimiento del algoritmo genético se ilustra en el diagrama de flujo mostrado en la Fig. 3.1 y puede resumirse de la siguiente manera:

- Se crea una población inicial, donde cada individuo está representado por un vector de tuplas $(\lambda_{j,m_i}, P_{j,m_i})$, con $j = 1, 2$ denotando el orden del bombeo y m_i el índice del modo. Cada individuo contiene todos los parámetros de bombeo necesarios para evaluar el desempeño del amplificador.

Para el caso considerado en este trabajo, la estructura de un individuo es la siguiente:

$$\begin{aligned} & \{(\lambda_{1,m_1}, P_{1,m_1}), (\lambda_{2,m_1}, P_{2,m_1})\}, \\ & \{(\lambda_{1,m_2}, P_{1,m_2}), (\lambda_{2,m_2}, P_{2,m_2})\}, \\ & \dots \\ & \{(\lambda_{1,m_n}, P_{1,m_n}), (\lambda_{2,m_n}, P_{2,m_n})\} \end{aligned}$$

Donde λ_{j,m_i} y P_{j,m_i} representan la longitud de onda y la potencia del bombeo de orden j para el modo m_i , con $j = 1$ para el bombeo de primer orden y $j = 2$ para el bombeo de segundo orden.

- Cada individuo es evaluado resolviendo el modelo FM-DFRA y calculando la función objetivo definida por las Ecs. ((3.5))–((3.6)). El mejor individuo de la población, determinado por el valor mínimo de la función objetivo $f(x)$, se selecciona y se guarda como la mejor solución actual.
- Si la mejor solución actual no cumple con las restricciones predefinidas, se genera una nueva población mediante los operadores de selección, cruce y mutación. La nueva población es entonces evaluada como en el paso anterior.
- El algoritmo itera hasta que se alcanza el número máximo de generaciones o la función objetivo converge a cero (es decir, $f(x) = 0$).

A través de este procedimiento se obtiene un perfil de ganancia que satisface las restricciones de uniformidad modal y espectral predefinidas (denotadas por μ).

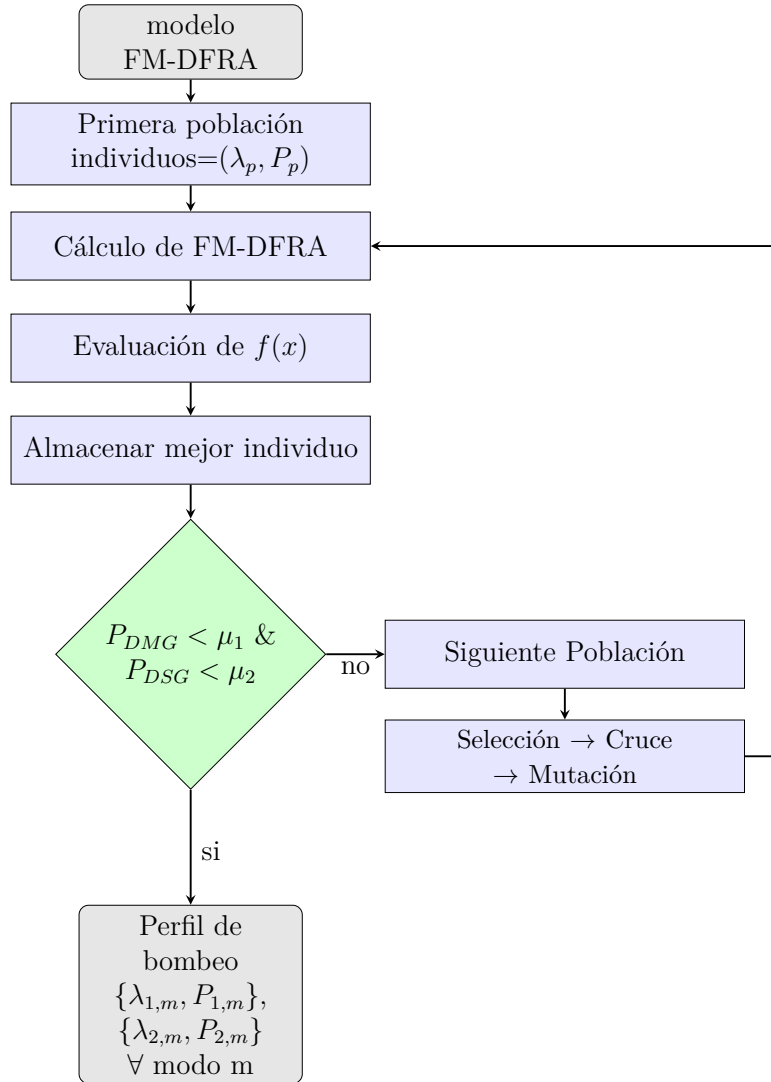


Figura 3.1: Diagrama de flujo del algoritmo genético usado para la optimización del perfil de bombeo en un FM-DRFA

3.4 Resumen

En este capítulo se presentó el diseño y optimización de un sistema de amplificación Raman distribuida en fibras multimodo (FM-DFRA) mediante el uso de métodos numéricos y algoritmos genéticos. Se abordó la resolución del sistema no lineal de ecuaciones diferenciales que describe la propagación de la potencia óptica en la fibra, utilizando el método de Euler debido a su simplicidad de implementación, aunque con un tamaño de paso reducido para garantizar precisión y estabilidad. Además, se implementó un método de relajación para manejar las condiciones iniciales en ambos extremos de la fibra, lo que permitió resolver el sistema de manera iterativa hasta alcanzar la convergencia. Posteriormente, se utilizó un algoritmo genético para optimizar los parámetros del sistema, minimizando las penalizaciones asociadas a la diferencia de ganancia entre modos (DMG) y la variación espectral de ganancia (DSG).

Capítulo 4

Caracterización y validación de modelo matemático del amplificador Raman-FMF mediante simulación numérica

4.1 Introducción

En este capítulo se aborda la caracterización y validación de un modelo matemático para amplificadores Raman en FMF, desarrollado a través de simulaciones numéricas en MATLAB®. El objetivo principal es demostrar la precisión y fiabilidad del modelo comparando sus resultados con los obtenidos mediante el software comercial VPIphotonics®, así como con datos reportados en la literatura especializada.

Dado que VPIphotonics® actualmente no contempla la amplificación Raman en FMF, la validación se ha realizado considerando la propagación en SMF y utilizando el modo LP_{01} . Se han estudiado escenarios de bombeo en configuración backward tanto para amplificadores de primer orden como para aquellos de segundo orden. En cada caso, se ha evaluado la evolución de la potencia de la señal, la distribución del bombeo, la ganancia y la generación del ruido ASE a lo largo de la fibra. Asimismo, se ha realizado un análisis detallado de los parámetros físicos de la fibra, como la integral de intensidad de solapamiento, el área efectiva y el índice de refracción efectivo, permitiendo contrastar los valores simulados con los reportados en la bibliografía.

La validación del modelo se apoya en la comparación de curvas de ganancia Raman,

donde se abordaron inicialmente discrepancias en el corte de la curva (27 THz) y se procedió a su extensión para lograr una mayor exactitud. Además, se evaluó la NF en configuraciones multimodales, lo cual permitió corroborar la capacidad del modelo para reproducir comportamientos complejos inherentes a sistemas de amplificación Raman en FMF. En definitiva, este trabajo establece las bases para el uso del modelo como una herramienta confiable en futuros estudios y optimizaciones de amplificadores Raman en FMF.

4.2 Validación

La ecuación 2.21 es simulada, tanto para bombeo, señales y ASE en Matlab ®. y se busca validar el modelo con el software comercial VPIphotonics ® para luego trabajar en los casos de estudio.

Dicha validación sólo podrá ser realizada en la propagación de SMF, ya que la aplicación aún no posee amplificación Raman FMF. Por tanto todas las señales a comprobar serán en el modo LP_{01} .

Se realizará una validación para el bombeo backward. Donde se comprobará la amplitud de la señal de propagación, de bombeo, la ganancia y el ASE al final de la fibra.

Se extraen los datos de pérdida y ganancia Raman del software VPIPhotonics®, donde se obtiene una curva de coeficiente Raman con corte en 27 THz. Dicho corte generó problemas en los capítulos siguientes, por tanto se generó una nueva curva con un corte más extendido.

Por tanto, en las comparaciones con VPIPhotonics ® se utilizará la curva de coeficiente de ganancia Raman en la Figura 4.1, mientras que en los siguientes cálculos se utilizará la curva de la Figura 4.2. En ambos casos se utilizará los siguientes parámetros de entrada entregados en la Tabla 4.1, estos datos pertenecen a los valores físicos de la fibra óptica simulada.

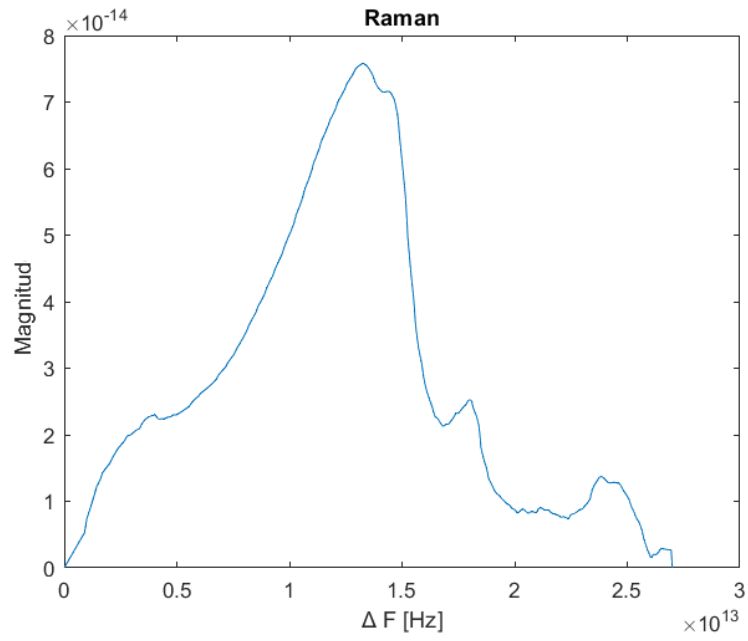


Figura 4.1: Curva de coeficiente de ganancia Raman entregada en VPIPhotonics[®]

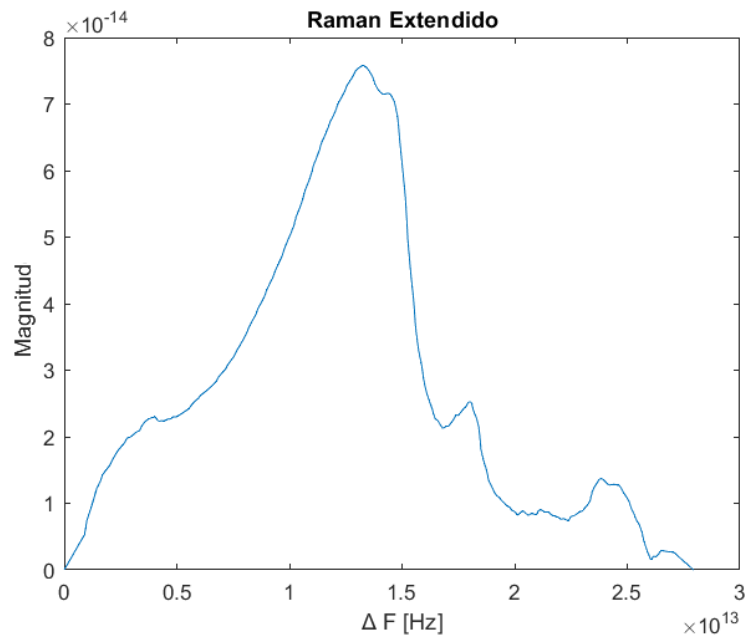


Figura 4.2: Curva de coeficiente de ganancia Raman extendida

Tabla 4.1: Parámetros de entrada al simulador

Parámetros de la fibra	Valores Utilizados
Largo de la fibra Raman	75 [km]
Radio del núcleo	7.5 [μm]
Coeficiente de atenuación	Archivo recopilado de VPIPhotonics®
Índice de refracción del núcleo	1.4698
Índice de refracción del revestimiento	1.46
Potencia del ruido ASE	-80 [dBm]
Ancho de Banda Ruido	0.2 [nm]

4.3 Bombeo Backward

En esta sección se realizara una comparación para un bombeo de primer orden y segundo orden entre el software VPIPhotonics y el simulador de Matlab.

4.3.1 Bombeo de primer orden

Los parámetros del perfil de bombeo y señal son entregados en la Tabla 4.2

Tabla 4.2: Parámetros de entrada al simulador de bombeo de de 1^{er} orden

Parámetro	Señal	Bombeo
Número de señales	40	3
Longitud de onda	[1530.3-1561.4] [nm]	[1428, 1445, 1466] [nm]
Modos polarizados linealmente	LP ₀₁	LP ₀₁
Potencia de entrada	0 mW	[425, 270, 259] [mW]
Dirección	-	Backward

Las Figuras 4.3,4.4 y 4.5 presentan una comparativa en la evolución de potencia de señal, bombeo y ruido ASE que poseen un comportamiento de bombeo de primer orden. Mientras que la Figura 4.6 representa la ganancia neta, esta ganancia resulta negativa ya que compara el valor de potencia inicial y final (No confundir con ganancia on-off que utiliza la comparación con el bombeo).

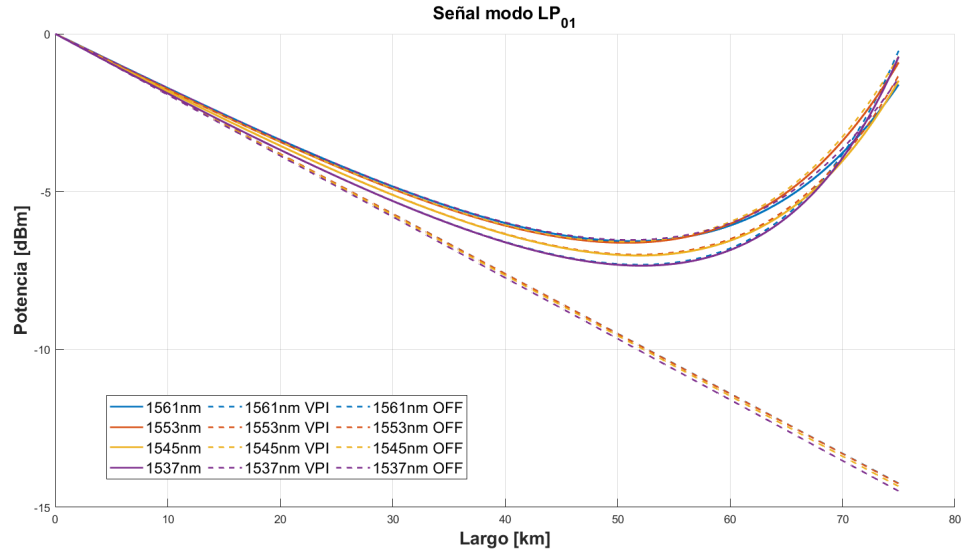


Figura 4.3: Evolución de potencia de señal de 1^{er} orden

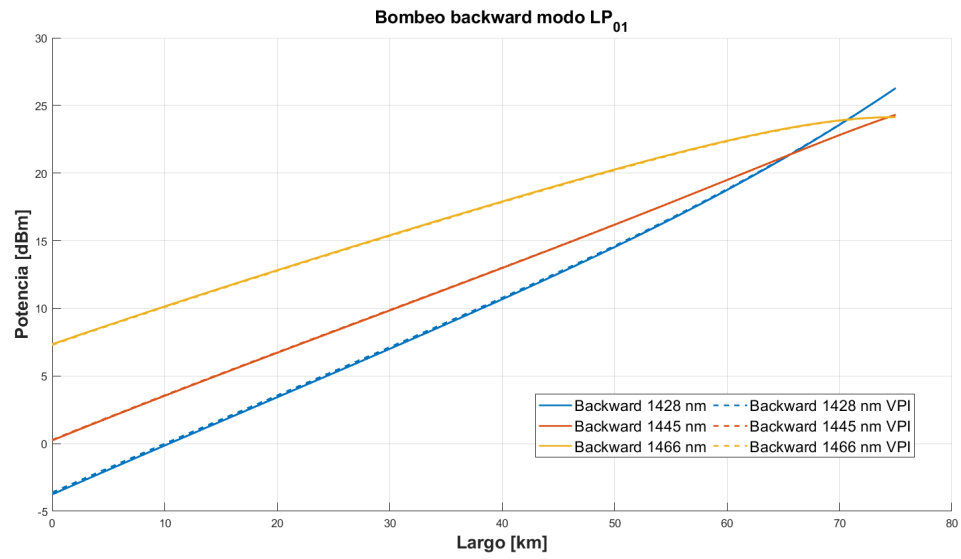


Figura 4.4: Evolución de potencia de bombeo backward de 1^{er} orden

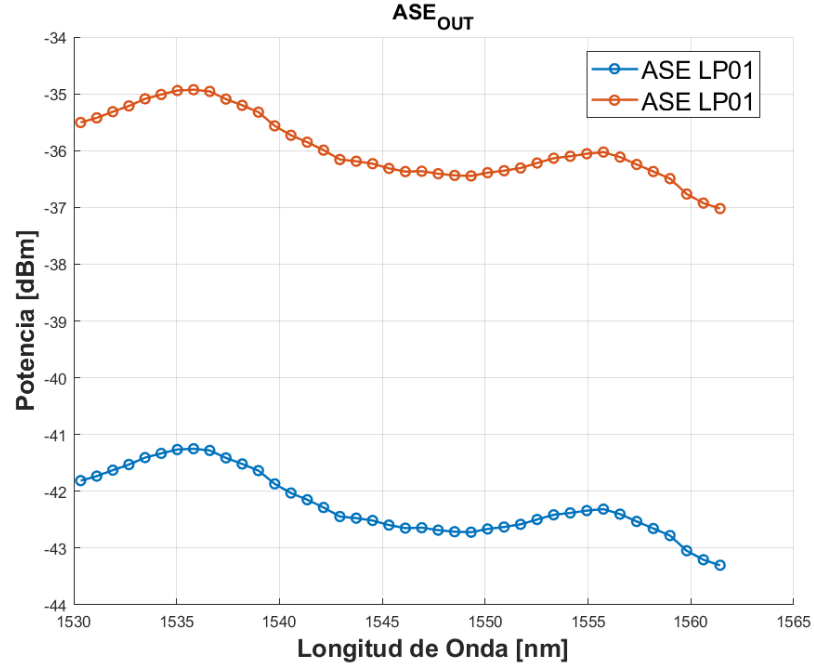


Figura 4.5: Potencia ASE al final de la fibra de 1^{er} orden

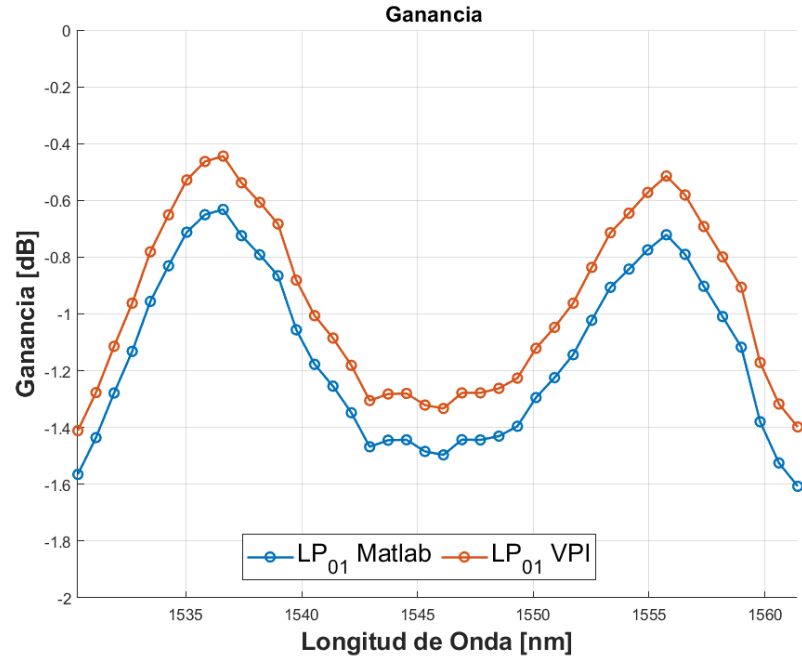


Figura 4.6: Ganancia de 1^{er} orden

Como se puede observar en las Figuras 4.3, 4.4 y 4.6 se observa una similitud en la curva con una diferencia de 0.2 dB en la ganancia, derivando una pequeña diferencia

en la potencia de señal.

Es importante destacar que en la Figura 4.5 se observa una variación considerable (6 dB) en el valor de potencia de ASE. Esta incongruencia puede ser originada por la ecuación de propagación de ASE que se utiliza en VPIPhotonics ®(no disponible).

4.3.2 Bombeo de segundo orden

Los parámetros del perfil de bombeo y señal son entregados en la Tabla 4.3

Tabla 4.3: Parámetros de entrada al simulador de bombeo de 2^{do} orden

Parámetro	Señal	Bombeo
Número de señales	40	2
Longitud de onda	[1530.3-1561.4] nm	[1365, 1455] nm
Modos Polarizados Linealmente	LP ₀₁	LP ₀₁
Potencia de entrada	0 mW	[1800, 10] mW
Dirección	-	Backward

Las Figuras 4.7,4.8 y 4.9 presentan una comparativa en la evolución de potencia de señal, bombeo y ruido ASE que poseen un comportamiento de bombeo de segundo orden. Mientras que la Figura 4.10 representa la ganancia neta.

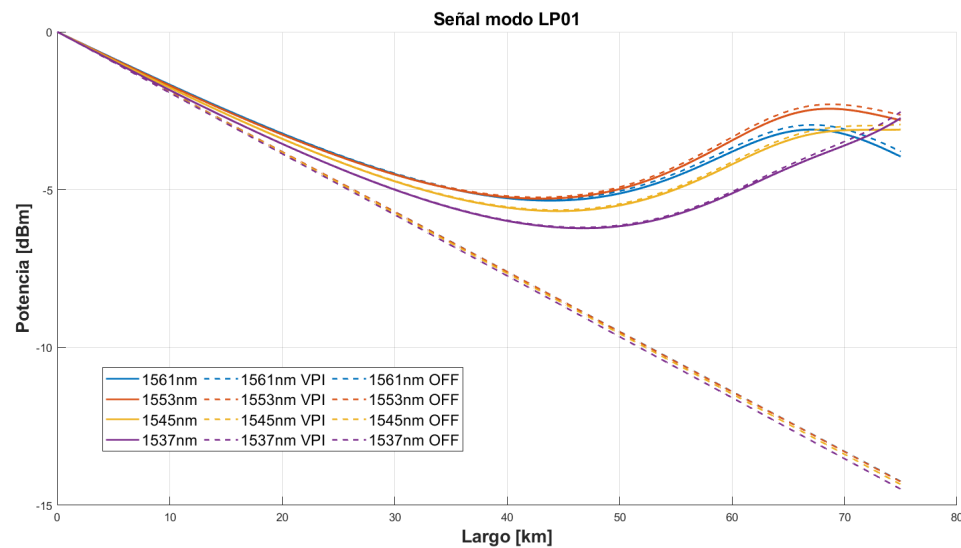


Figura 4.7: Evolución de potencia de señal de 2^{do} orden

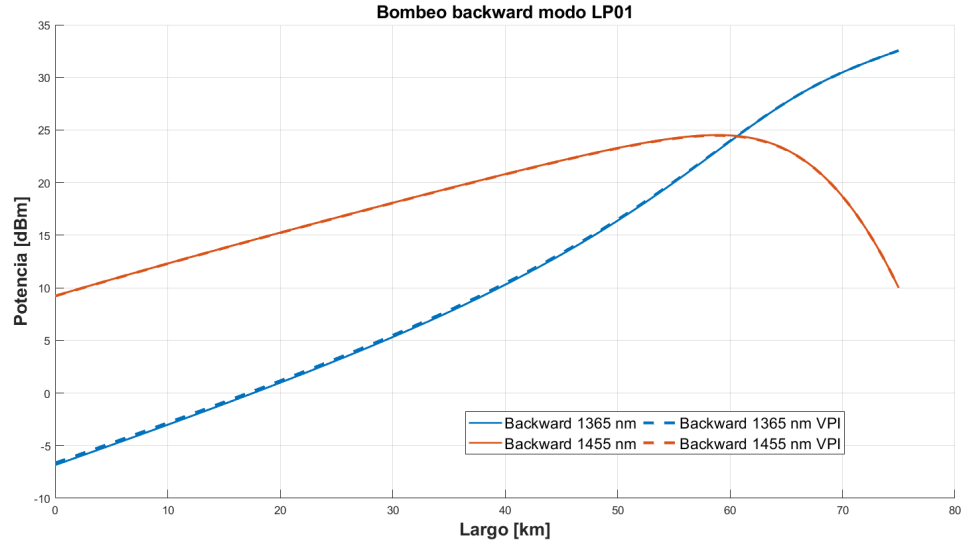


Figura 4.8: Evolución de potencia de bombeo backward de 2^{do} orden

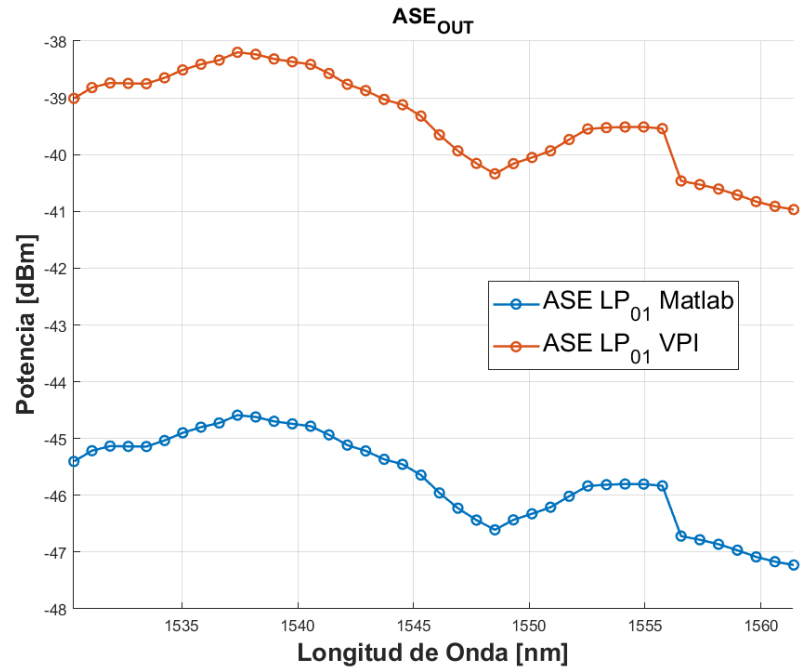


Figura 4.9: Potencia ASE al final de la fibra de 2^{do} orden

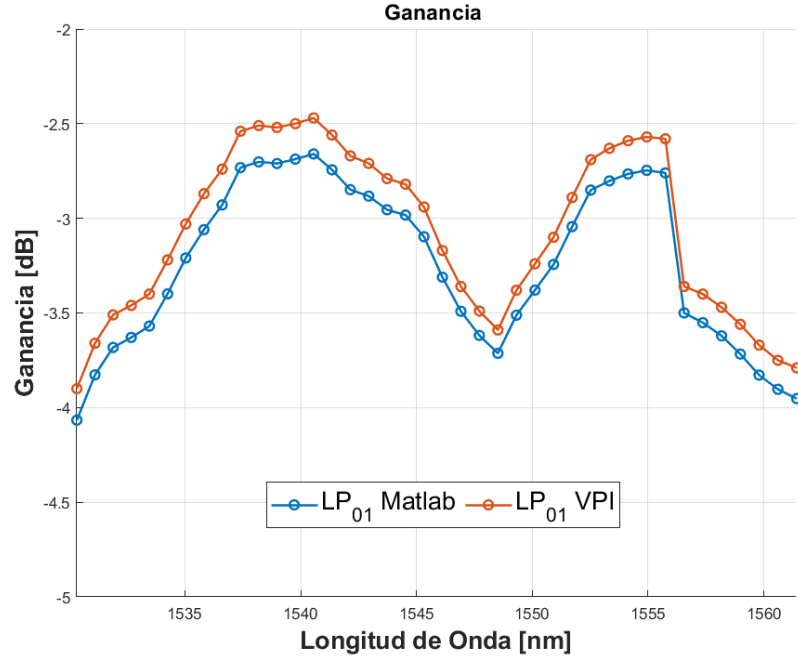


Figura 4.10: Ganancia de 2^{do} orden

En este caso, se observa el mismo comportamiento que en el caso anterior, con las curvas comparables pero con 0.2 dB de diferencia en la ganancia.

De igual manera que en el bombeo de primer orden, en la Figura 4.9 se observa una variación de 6 dBm en el valor de ASE al final de la fibra.

Como se comentó al inicio de este capítulo, se observa un cambio abrupto cercano a 1556 nm en la ganancia causado por el uso de la primera curva de Raman debido al uso de bombeo de segundo orden (separación mayor a 27 THz).

Por último, como comparativa de bombeo de 1^{er} y 2^{do} orden, se observa como en la Figura 4.7 la amplitud comienza a amplificarse antes debido al perfil de 2^{do} orden, en la Figura 4.8 se observa una amplificación en la señal de longitud de onda mayor (amplificada por la menor), en la Figura 4.9 se aprecia un menor valor en el ruido ASE y en la Figura 4.10 una menor ganancia neta, a expensas de un perfil de potencia de bombeo mayor.

4.4 Evaluación de NF efectiva multimodal

A partir del trabajo desarrollado en [2], el cual proporciona los parámetros de configuración de la fibra óptica, se llevaron a cabo comparaciones con los resultados obtenidos mediante simulación, observándose lo siguiente.

La Tabla 4.4 entrega los valores de 2.20 para cada par de modos correspondientes analizada por [2], mientras que la Tabla 4.5 son los valores obtenidos a partir de simulación, se observa una diferencia en los modos LP_{11} y LP_{21} , es por esto que se decide comparar la ganancia on-off y los valores de ruido para validar la propagación de múltiples modos.

Tabla 4.4: Integral de intensidad de solapamiento $f_{m,n}$ (en $10^9/m^2$) para la fibra de 4 modos LP entregada en [2].

$f_{m,n}$	LP_{01} : HE_{11}	LP_{11} : $TE_{01}, TM_{01}, HE_{21}$	LP_{21} : HE_{31}, EH_{11}	LP_{02} : HE_{21}
LP_{01} : HE_{11}	8.07	5.34	3.72	5.99
LP_{11} : $TE_{01}, TM_{01}, HE_{21}$	5.34	5.65	4.96	3.04
LP_{21} : HE_{31}, EH_{11}	3.72	4.96	5.01	2.77
LP_{02} : HE_{21}	5.99	3.04	2.77	7.88

Tabla 4.5: Integral de intensidad de solapamiento $f_{m,n}$ (en $10^9/m^2$) para la fibra de 4 modos LP calculada en la simulación.

$f_{m,n}$	LP_{01} : HE_{11}	LP_{11} : $TE_{01}, TM_{01}, HE_{21}$	LP_{21} : HE_{31}, EH_{11}	LP_{02} : HE_{21}
LP_{01} : HE_{11}	8.10	5.36	3.72	6.05
LP_{11} : $TE_{01}, TM_{01}, HE_{21}$	5.36	6.88	4.83	3.06
LP_{21} : HE_{31}, EH_{11}	3.72	4.83	6.10	2.79
LP_{02} : HE_{21}	6.05	3.06	2.79	8.11

En dicho trabajo, también entregan los valores de área efectiva e índice de refracción efectivo (índice de refracción que depende del modo de propagación y los índices del núcleo y del revestimiento) a 1550 nm. Estos valores son entregados en las Tablas 4.6 y 4.7

Tabla 4.6: Características de la fibra de 4 modos LP entregada en [2]

	LP_{01}	LP_{11}	LP_{21}	LP_{02}
$A_{\text{eff}} (\mu\text{m}^2)$	124	118	133	127
$(n_{\text{eff}} - n_{\text{cl}})$ a 1550 nm ($\times 10^{-3}$)	8.3	6.0	3.2	2.4

Tabla 4.7: Características de la fibra de 4 modos LP calculada en el simulador

	LP_{01}	LP_{11}	LP_{21}	LP_{02}
$A_{\text{eff}} (\mu\text{m}^2)$	123	145	164	123
$(n_{\text{eff}} - n_{\text{cl}})$ a 1550 nm ($\times 10^{-3}$)	8.3	6.1	3.3	2.4

Por último, también se presentan los valores de Ganancia On-Off (dB) y potencia de ASE (dBm) correspondientes a los siguientes parámetros, los cuales se resumen en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Parámetros de entrada bombeo de 1^{er} orden

Parámetro	Señal	Bombeo
Número de señales	-	1
Longitud de onda	[1530-1565] nm	[1455] nm
Modos Polarizados Linealmente	LP ₀₁ , LP _{11a} , LP _{11b}	LP ₀₁ , LP _{11a} , LP _{11b}
Potencia de entrada	0 mW	[54.6], [102.7], [102.7] mW
Dirección	Forward	Backward

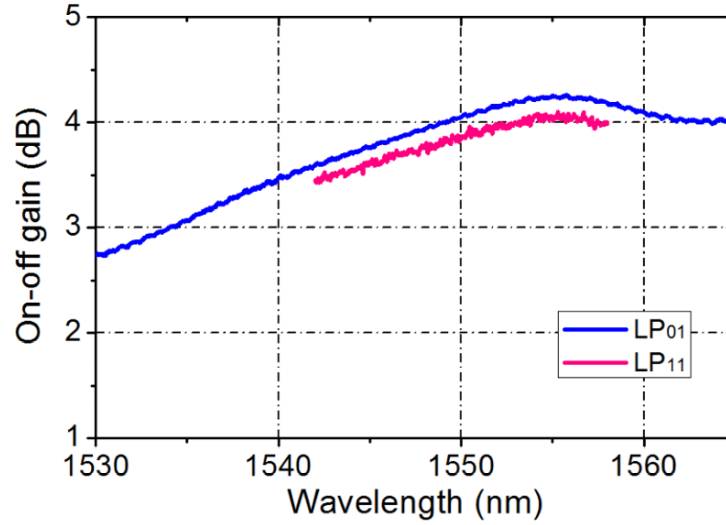


Figura 4.11: Ganancia On-Off de primer orden entregada en [2]

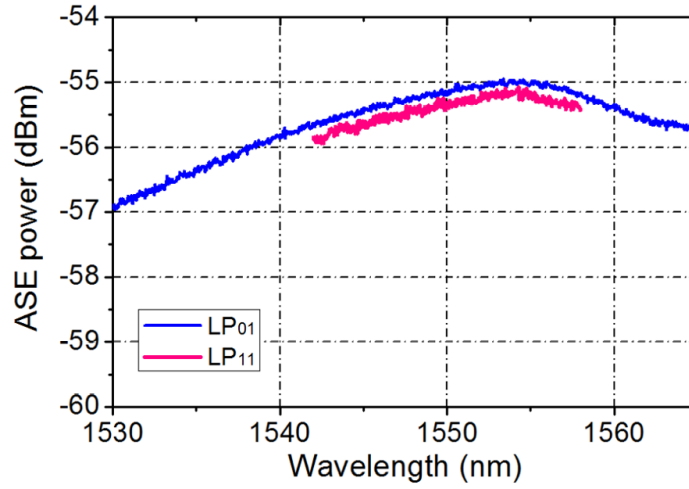


Figura 4.12: Potencia ASE de primer orden entregada en [2]

Tabla 4.9: Parámetros de entrada bombeo de 2^{do} orden

Parámetro	Señal	Bombeo
Número de señales	-	2
Longitud de onda	[1530-1565] nm	[1360, 1455] nm
Modos Polarizados Linealmente	LP ₀₁ , LP _{11a} , LP _{11b}	LP ₀₁ , LP _{11a} , LP _{11b}
Potencia de entrada	0 [mW]	[270.9, 6.3], [509.55, 11.85], [509.55, 11.85] [mW]
Dirección	-	Backward

Además en el trabajo [2] entregan las Figuras 4.13 y 4.14.

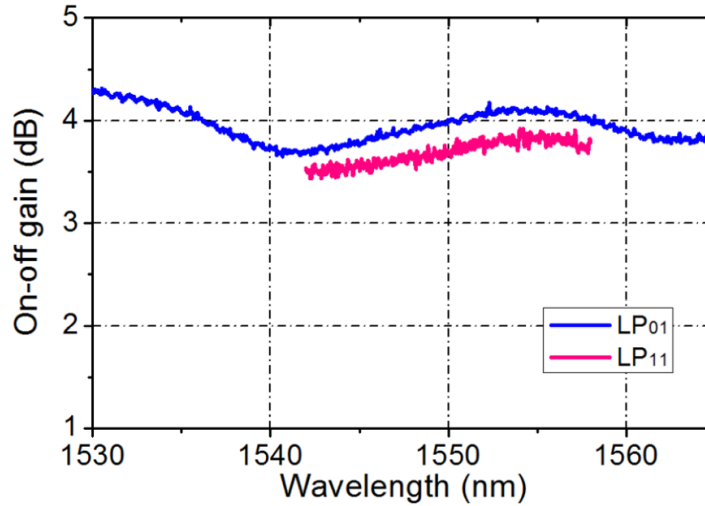


Figura 4.13: Ganancia On-Off de Segundo Orden entregada en [2]

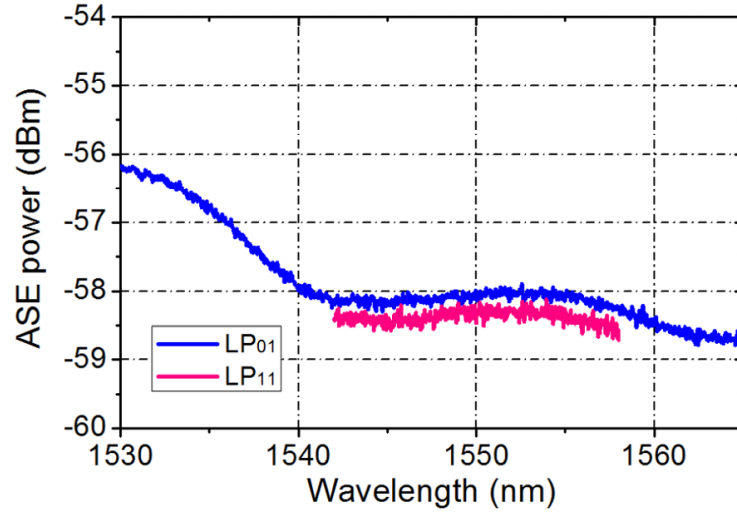


Figura 4.14: Potencia ASE de Segundo Orden entregada en [2]

Se replica los valores de potencia en 36 canales distribuidos entre 1530 nm y 1565 nm con 1 nm de distancia.

Tabla 4.10: Parámetros de entrada al simulador para bombeo de 1^{er} orden

Parámetro	Señal	Bombeo
Número de señales	36	1
Longitud de onda	[1530-1565] nm	[1455] nm
Modos Polarizados Linealmente	LP ₀₁ , LP _{11a} , LP _{11b}	LP ₀₁ , LP _{11a} , LP _{11b}
Potencia de entrada	0 [mW]	[54.6], [102.7], [102.7] [mW]
Dirección	-	Backward

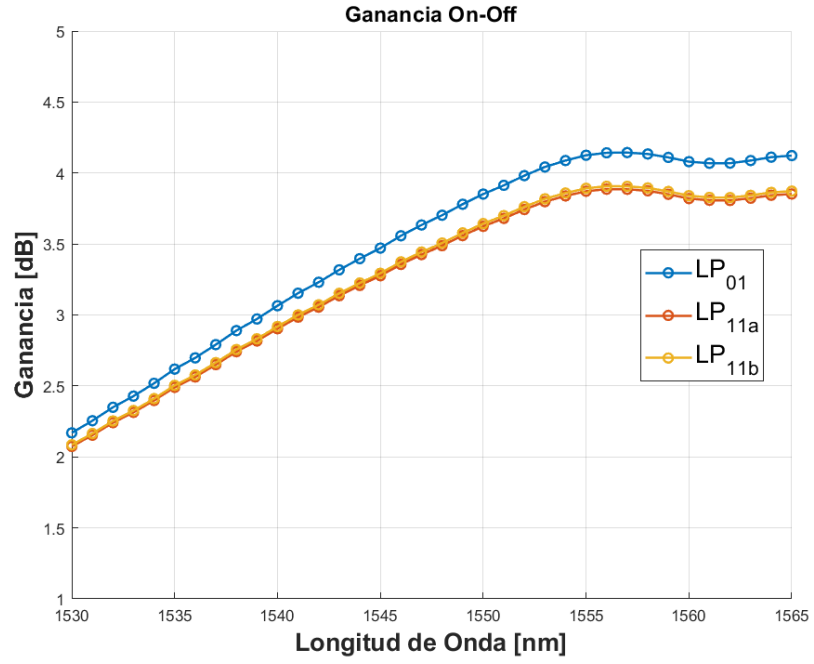


Figura 4.15: Ganancia On-Off de 1^{er} orden obtenida en el Simulador

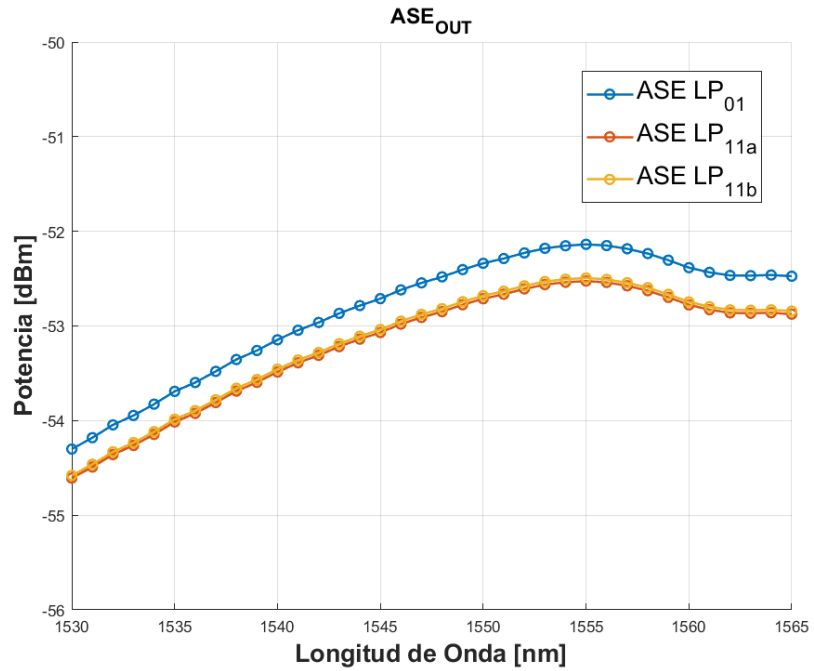


Figura 4.16: Ruido ASE en la salida de 1^{er} orden obtenida en el simulador

En esta situación de bombeo de primer orden, al comparar 4.11 y 4.15 se observa un comportamiento similar en las curvas y en los valores esperados.

Sin embargo, al comparar las Figuras 4.12 y 4.16, se observa una diferencia significativa en los valores obtenidos, a pesar de que la forma de la curva se mantiene similar. Una posible explicación para esta discrepancia es el uso de algún filtro para atenuar el ruido, ya sea dentro del OSA o en un procesamiento posterior. Cabe destacar que el artículo no proporciona información específica al respecto.

Por otro lado, se entregó al simulador los valores resumidos de la Tabla 4.11 para realizar una comparación en el perfil de 2^{do} orden.

Tabla 4.11: Parámetros de entrada al simulador para bombeo de 2^{do} orden

Parámetro	Señal	Bombeo
Número de señales	36	2
Longitud de onda	[1530-1565] nm	[1360, 1455] nm
Modos Polarizados Linealmente	LP ₀₁ , LP _{11a} , LP _{11b}	LP ₀₁ , LP _{11a} , LP _{11b}
Potencia de entrada	0 mW	[270.9, 6.3], [509.55, 11.85], [509.55, 11.85] mW
Dirección	-	Backward

Con los parámetros anteriores, se crean las Figuras 4.17 y 4.18.

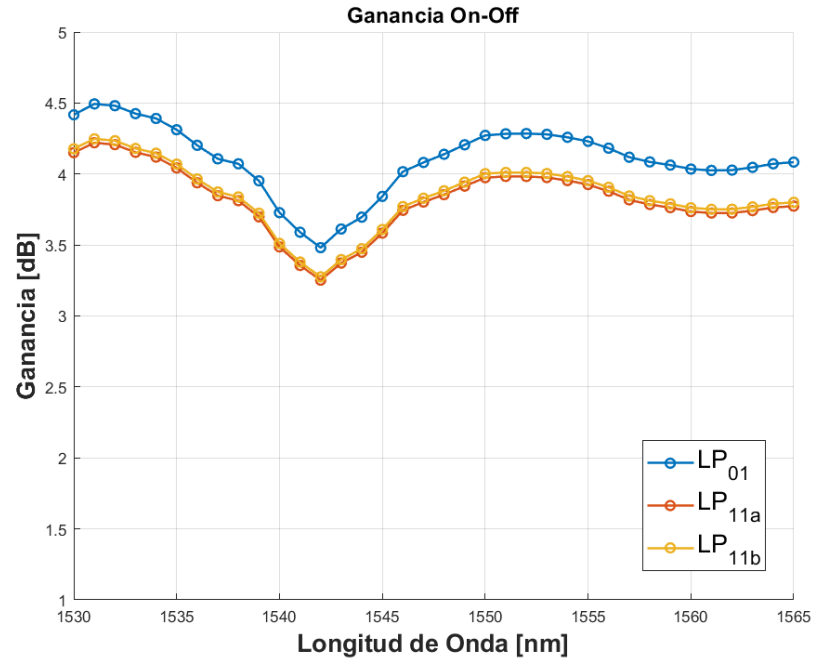


Figura 4.17: Ganancia On-Off de 2^{do} orden obtenida en el simulador

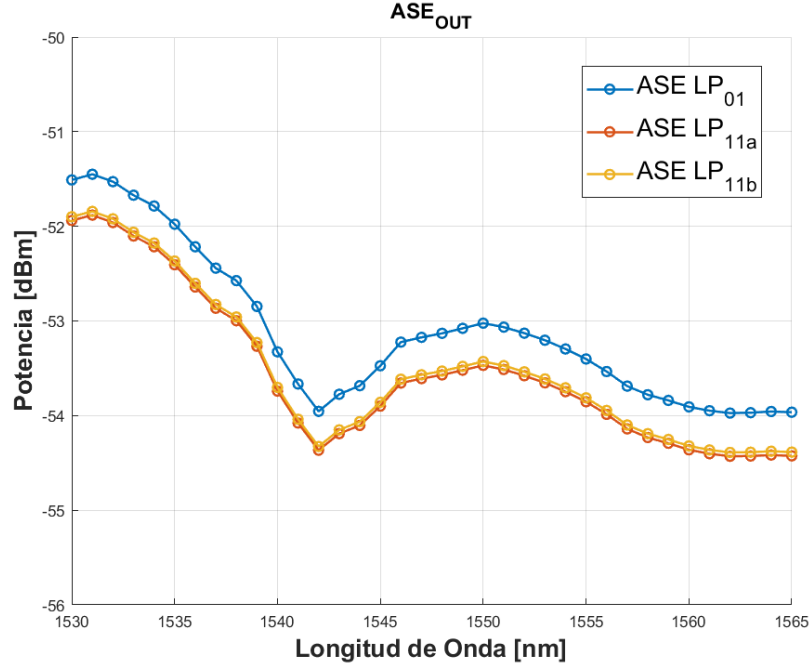


Figura 4.18: Ruido ASE en la salida de 2^{do} orden obtenida en el simulador

En esta situación de bombeo de segundo orden, al comparar 4.13 y 4.17 se observa un comportamiento similar en las curvas y en los valores esperados.

En el análisis del ASE ocurre lo mismo al comparar las Figuras 4.14 y 4.18, donde se observa un comportamiento similar en la curva pero en diferente posición.

Por último en el trabajo de [2] realizan un estudio en la mejora de la NF efectiva al utilizar diferentes configuraciones de bombeo de 2^{do} orden. Varían la potencia del bombeo a 1360 nm y 1455 nm para obtener una Ganancia On-Off fija a 4 dB para LP₀₁ y de 3.8 para el promedio entre LP_{11a} y LP_{11b}.

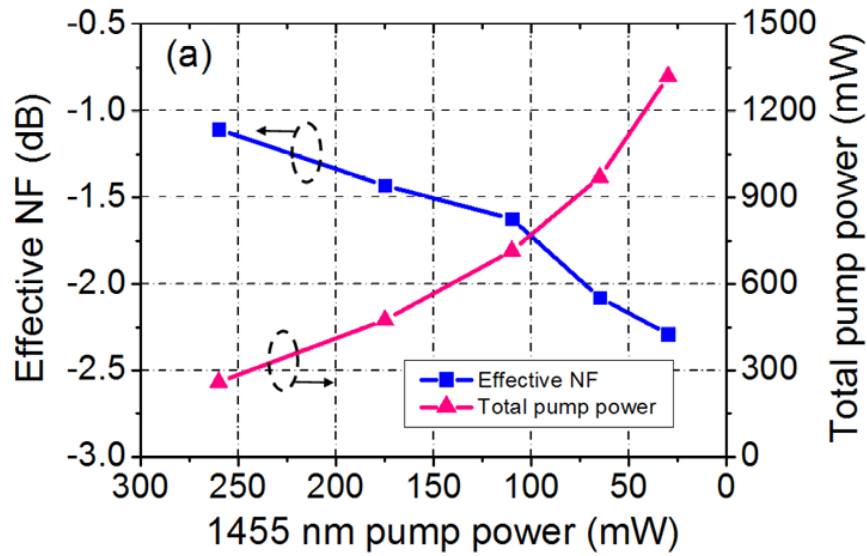


Figura 4.19: NF efectivo y potencia de bombeo total como función del bombeo de 1455 nm para el modo LP_{01} , la ganancia está fija en 4dB [2].

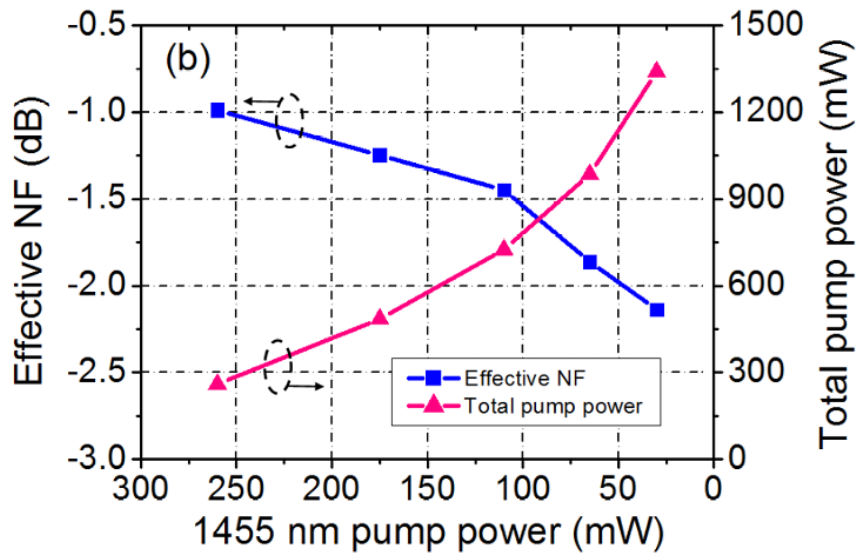


Figura 4.20: NF efectivo y potencia de bombeo total como función del bombeo de 1455 nm para el modo LP_{01} , la ganancia está fija en 3.8 dB [2].

En las Figuras 4.19 y 4.20 se observa una variación entre -1 y -2.3 dB, con una mejora de -1.3 dB en la figura de ruido en el caso extremo. Esto ocurre debido a que la señal es amplificada antes en el largo de la fibra, mejorando la OSNR (potencia de señal más alta).

Por otro lado, se realiza el mismo ensayo en el simulador y se obtienen los siguientes resultados.

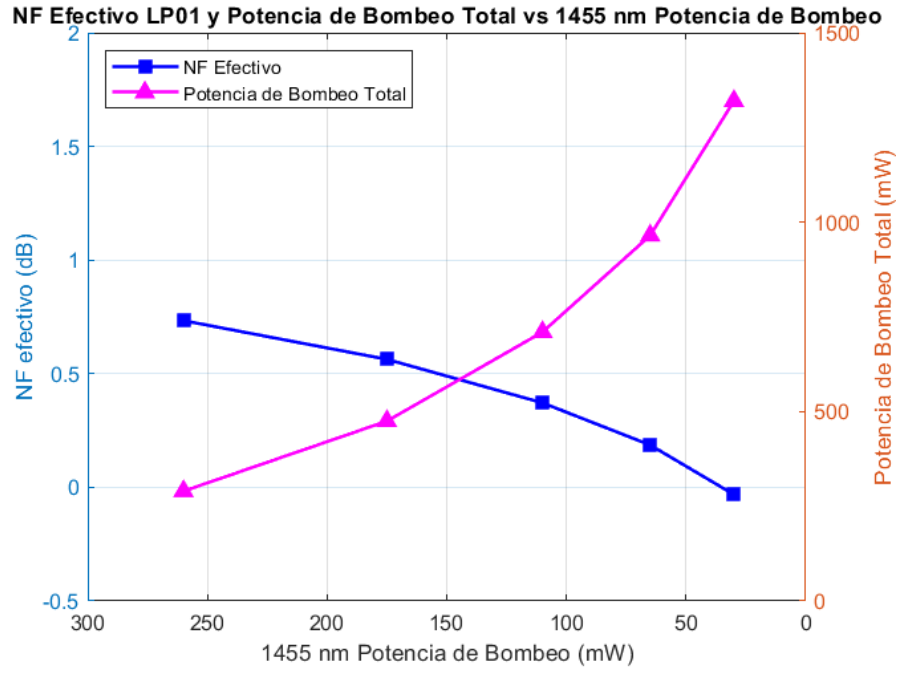


Figura 4.21: NF efectiva y potencia de bombeo total como función del bombeo de 1455 nm para el modo LP_{01} , la ganancia está fija en 4 dB modelado

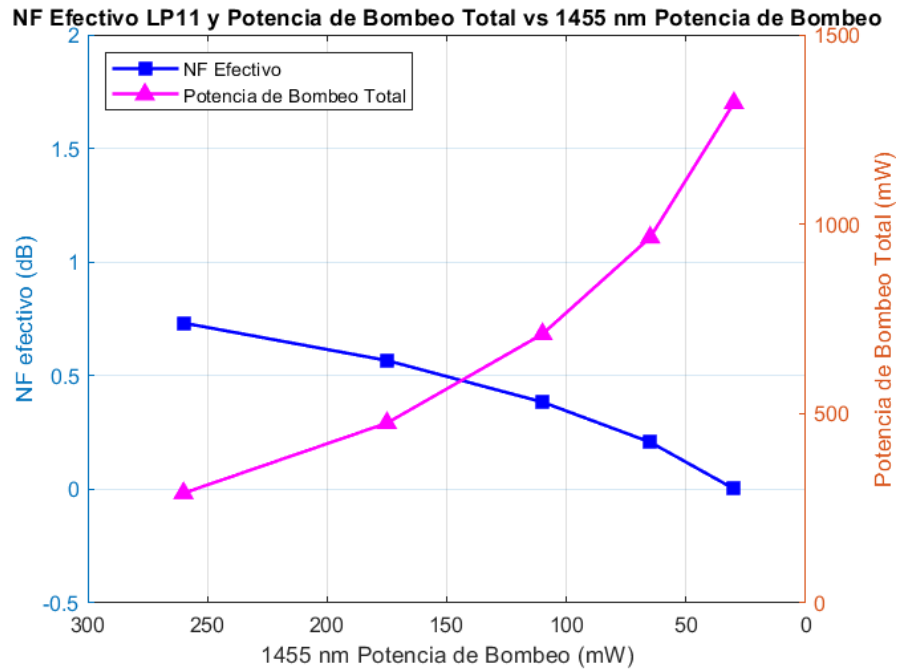


Figura 4.22: NF efectiva y potencia de bombeo total como función del bombeo de 1455 nm para el modo LP_{11} , la ganancia está fija en 3.8 dB modelado

En las Figuras 4.21 y 4.22 se observa una variación en la figura de ruido efectiva

(NF) entre 0.8 dB y valores cercanos a 0 dB, alcanzando una mejora de hasta -0.8 dB en el caso extremo. Esta diferencia se atribuye principalmente al factor de un perfil de bombeo de 2^{do} orden favorece un perfil de potencia de señal más uniforme a lo largo de la fibra, evitando picos locales de saturación que pueden degradar el NF.

4.5 Resumen

En el presente capítulo se ha realizado la validación y caracterización de un modelo numérico para amplificadores Raman en (FMF, implementado en MATLAB ®, mediante un enfoque riguroso basado en dos metodologías complementarias.

En primer lugar, se llevó a cabo una validación exhaustiva en configuración monomodo (SMF) utilizando el software comercial VPIphotonics ® como referencia. Este análisis se centró en configuraciones de bombeo backward, tanto de primer como de segundo orden, evaluando específicamente el modo fundamental LP₀₁. Los resultados demostraron una excelente concordancia en la evolución de la potencia de señal y bombeo, con diferencias inferiores a 0.2 dB en los valores de ganancia. Sin embargo, se observaron discrepancias de aproximadamente 6 dB en los niveles de ruido ASE, lo que se atribuye a diferencias en la implementación de las ecuaciones de propagación del ruido entre ambas plataformas.

Posteriormente, se realizó una validación adicional mediante la comparación con resultados publicados en la literatura científica para configuraciones multimodal. Este proceso incluyó la evaluación de parámetros fundamentales como los coeficientes de solapamiento modal ($f_{m,n}$), las áreas efectivas y los índices de refracción efectivos para diferentes modos LP. Los valores simulados mostraron una notable coincidencia con los datos reportados, particularmente para los modos LP₀₁ y LP₀₂. Asimismo, los perfiles de ganancia On-Off obtenidos replicaron fielmente el comportamiento documentado, tanto para bombeo de primer como de segundo orden. No obstante, se detectaron variaciones en los niveles de ruido ASE, posiblemente asociadas a diferencias en los esquemas de filtrado empleados en las mediciones experimentales.

Un aspecto destacable del estudio fue el análisis de la NF efectiva en configuraciones de bombeo de segundo orden. Los resultados demostraron una mejora de hasta -0.8 dB en el NF para el modo LP₀₁, consistente con las predicciones teóricas que indican una mejor distribución de la potencia de señal a lo largo de la fibra. Este comportamiento confirma las ventajas del bombeo de segundo orden en términos de eficiencia energética y reducción de ruido.

En conclusión, el modelo matemático implementado ha demostrado ser una her-

ramienta robusta y confiable para el análisis de amplificadores Raman-FMF. Las validaciones realizadas, tanto con software comercial como con datos experimentales publicados, respaldan su precisión en la simulación de parámetros clave como ganancia, ruido ASE y NF efectiva. Estos resultados establecen una base sólida para futuras investigaciones orientadas a la optimización de sistemas de comunicación óptica multimodales.

Capítulo 5

Estudio de Casos

5.1 Introducción

En esta sección, se presenta un estudio detallado de la optimización de amplificadores Raman-FMF mediante el uso de algoritmos genéticos, con el objetivo de minimizar tanto el DSG como el DMG en configuraciones de bombeo de segundo orden. Se analizan dos casos principales: uno con tres modos de propagación (LP_{01} , LP_{11a} y LP_{11b}) y otro con seis modos (LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b} , LP_{02} , LP_{21a} y LP_{21b}). Además, se exploran diferentes estrategias de bombeo, incluyendo la variación de longitudes de onda y potencias, para lograr el mejor equilibrio entre ganancia, uniformidad y ruido.

Los resultados obtenidos demuestran que es posible alcanzar una ganancia estable y uniforme en la banda C (1530–1565 nm) con una figura de ruido efectiva baja, lo que confirma el potencial de los amplificadores Raman-FMF para su implementación en sistemas de comunicación óptica de alta capacidad.

5.2 Optimización de DSG y DMG en bombeo de segundo orden con 3 modos de propagación

En esta sección se simula la propagación para señal y bombeo de los modos LP_{01} , LP_{11a} y LP_{11b} para realizar un análisis a partir de la variación de las longitudes de onda para la optimización de bombeo backward.

5.2.1 Caso 1: Longitud de onda de bombeo fija

En este estudio se buscó minimizar el ripple de ganancia en un sólo modo (DSG) y entre modos (DMG) para 36 canales WDM separados equidistantes entre 1530-1565 nm (Banda C) mediante el uso de las librerías de MATLAB® de algoritmo genético.

Se generó una función objetivo (3.7) la cual penaliza si el DSG era mayor a 0.2 dB, si el DMG era mayor a 0.1 dB.

Se establecen límites para la búsqueda de la solución dentro de las longitudes de onda predefinidas (1360 nm y 1455 nm), con el objetivo de obtener bombeo de segundo orden y minimizar la NF. Estas dos longitudes de onda fueron seleccionadas debido a un pequeño peak de ganancia alrededor de 24 THz, como se muestra en la Figura 2.8, donde se observa que el bombeo en 1350 nm amplifica las longitudes de onda cercanas a 1530 nm debido al peak de ganancia a 24 THz. Los límites considerados para la optimización se detallan en la Tabla 5.1.

Límites de Potencia		
	Longitud de onda 1360 nm	Longitud de onda 1455 nm
Potencia LP ₀₁ mW	[200-400]	[0-30]
Potencia LP _{11a} mW	[300-600]	[10-30]
Potencia LP _{11b} mW	[300-600]	[10-30]

Tabla 5.1: Rangos de búsqueda de potencias de bombeo del algoritmo genético

En la ejecución del algoritmo genético no se alcanzó una solución que cumpliera completamente con los criterios propuestos. Sin embargo, dado que las longitudes de onda de bombeo se mantuvieron fijas (1360 nm y 1455 nm), los resultados obtenidos son considerados aceptables. El algoritmo concluyó al alcanzar el número máximo de generaciones permitidas, lo que indica que, dentro del espacio de búsqueda definido por estos parámetros, se logró una convergencia razonable sin mejoras significativas en las últimas iteraciones. La solución es entregada en la Tabla ??

Solución Encontrada		
	Longitud de onda 1360 [nm]	Longitud de onda 1455 [nm]
Potencia LP ₀₁ [mW]	227.5	3.05
Potencia LP _{11a} [mW]	411.4	25.1
Potencia LP _{11b} [mW]	377.9	21.0

Tabla 5.2: Solución encontrada algoritmo genético

La solución obtenida a partir del algoritmo genético, considerando las restricciones impuestas y el número máximo de generaciones, entrega un conjunto de resultados que se ilustran en las Figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5. Estas figuras permiten visualizar el comportamiento del sistema bajo las condiciones optimizadas, incluyendo la evolución de las potencias ópticas, la ganancia obtenida, la NF y otros parámetros relevantes para el desempeño del amplificador.

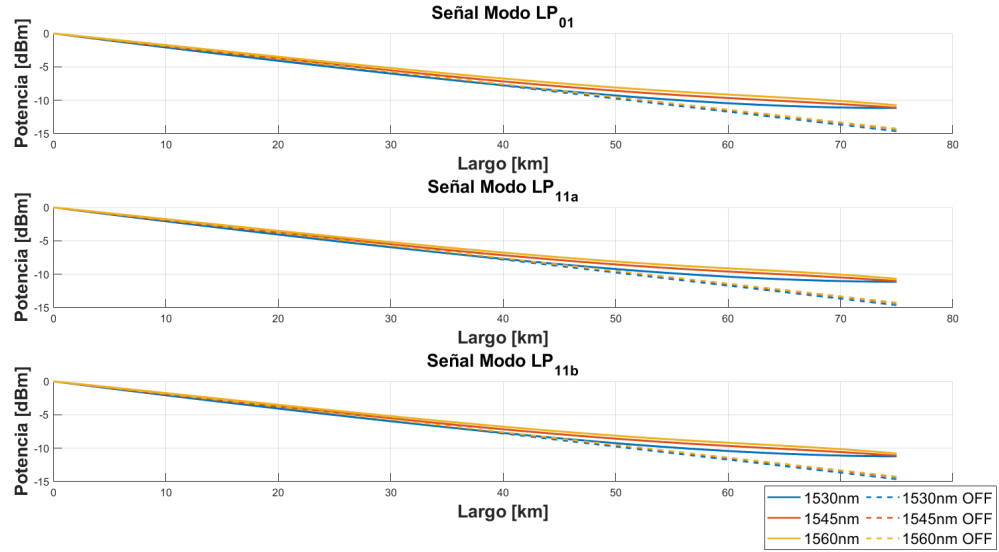


Figura 5.1: Evolución de potencia de señal

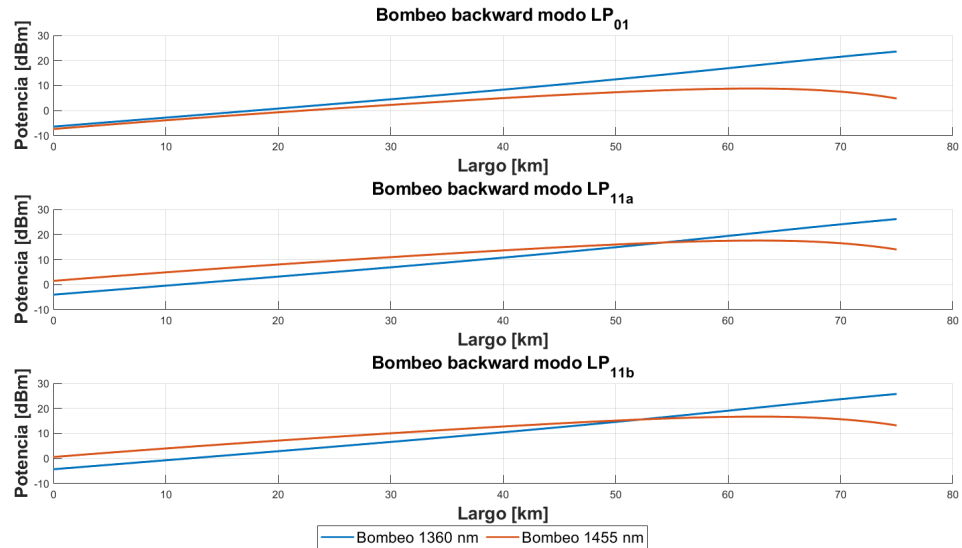


Figura 5.2: Evolución de potencia de bombeo

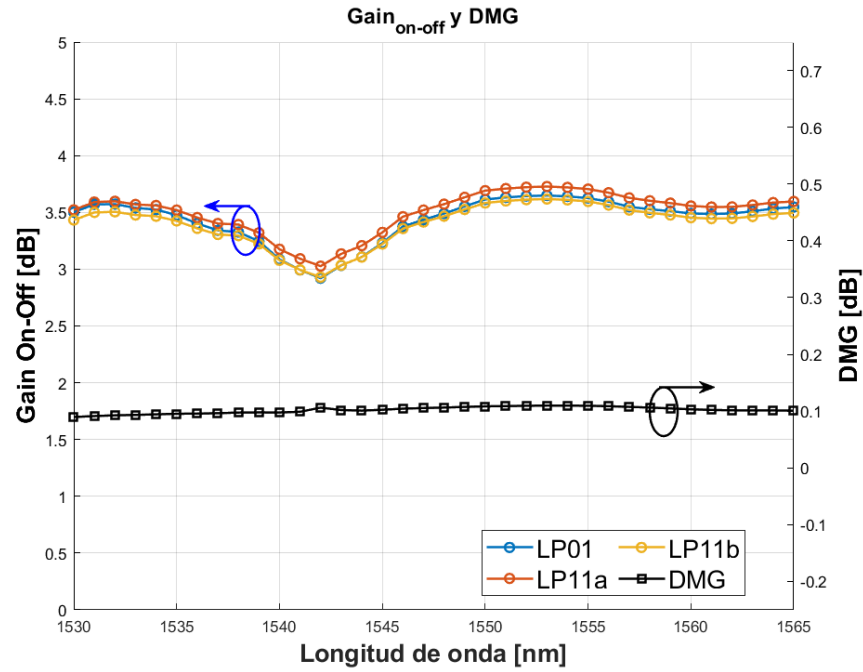


Figura 5.3: Ganancia On-Off y DMG

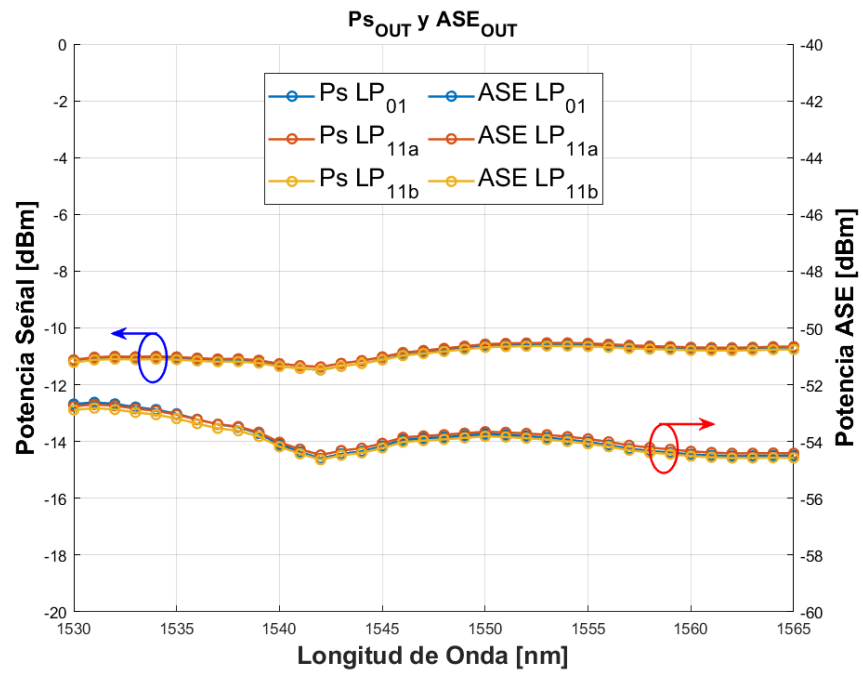


Figura 5.4: Potencia de señal y ASE a la salida del amplificador

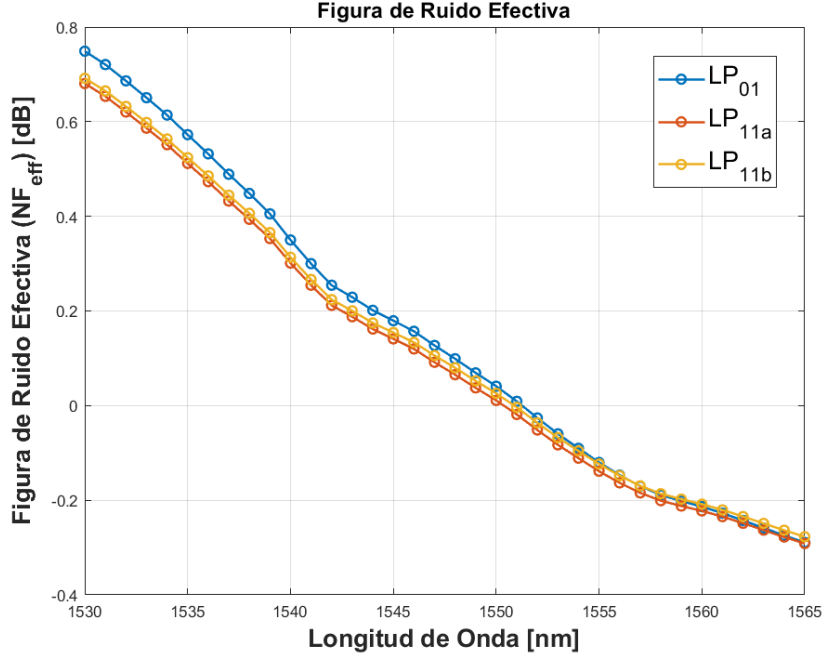


Figura 5.5: Figura de Ruido Efectiva

Luego del proceso de optimización, se obtiene una variación de ganancia de 0.7283, 0.7010 y 0.6891 dB para los modos LP₀₁, LP_{11a} y LP_{11b}, respectivamente. En cuanto al DMG, se alcanza un valor máximo de solo 0.1098 dB entre los modos LP_{11a} y LP_{11b}, lo que indica una distribución uniforme de la ganancia entre los modos propagantes. Además, se observa una figura de ruido efectiva que varía entre -0.2 dB y 0.8 dB a lo largo del ancho de banda de la señal.

Cabe destacar que, en la región de mayores longitudes de onda dentro de la banda C, se evidencia una mejora en la figura de ruido, atribuida al efecto del bombeo de segundo orden. Este efecto se aprecia con mayor claridad en la Figura ??, donde el bombeo en 1360 nm potencia eficientemente las señales cercanas a 1560 nm. En conjunto, se observa un perfil de DMG plano y un DSG menor a la reportada en [2], lo cual evidencia una mejor ecualización modal y espectral del sistema propuesto.

5.2.2 Caso 2: Longitud de onda de bombeo variable

En este caso se realiza un algoritmo genético con variación tanto en longitud de onda como en las potencias relacionadas al bombeo.

Se utilizó la misma función objetivo, la cual penaliza si el DSG era mayor a 0.2 dB, si el DMG era mayor a 0.1 dB o si la ganancia era menor a 3 dB y volvió a terminar al alcanzar el número máximo de poblaciones.

En este caso se escoge el rango de longitud de onda para que se cumpla bombeo de segundo orden en los tres bombeos.

Los límites se presentan en las Tablas 5.3 y 5.5 y las soluciones en las Tablas 5.4 y 5.6

Límites de búsqueda longitud de onda algoritmo genético		
	λ 2 ^{do} orden	λ 1 ^{er} orden
λ LP ₀₁ [nm]	[1300-1380]	[1430-1480]
λ LP _{11a} [nm]	[1300-1380]	[1430-1480]
λ LP _{11b} [nm]	[1300-1380]	[1430-1480]

Tabla 5.3: Límites longitud de onda algoritmo genético

Solución encontrada longitud de onda algoritmo genético		
	λ 2 ^{do} orden	λ 1 ^{er} orden
λ LP ₀₁ [nm]	1373	1477
λ LP _{11a} [nm]	1364	1455
λ LP _{11b} [nm]	1359	1452

Tabla 5.4: Solución encontrada longitud de onda algoritmo genético

Límites de Potencia		
	2 ^{do} orden	1 ^{er} orden
Potencia LP ₀₁ [mW]	[100-300]	[5-20]
Potencia LP _{11a} [mW]	[100-600]	[5-40]
Potencia LP _{11b} [mW]	[100-600]	[5-40]

Tabla 5.5: Límites potencia algoritmo genético

Solución encontrada potencia algoritmo genético		
	2 ^{do} orden	1 ^{er} orden
Potencia LP ₀₁ [mW]	185.1	11.4
Potencia LP _{11a} [mW]	339.7	22.0
Potencia LP _{11b} [mW]	604.4	17.3

Tabla 5.6: Solución encontrada potencia algoritmo genético

Con dicho perfil de bombeo para cada modo en particular se generan los siguientes resultados mostrados en las Figuras 5.6, 5.7, 5.8, ?? y 5.10.

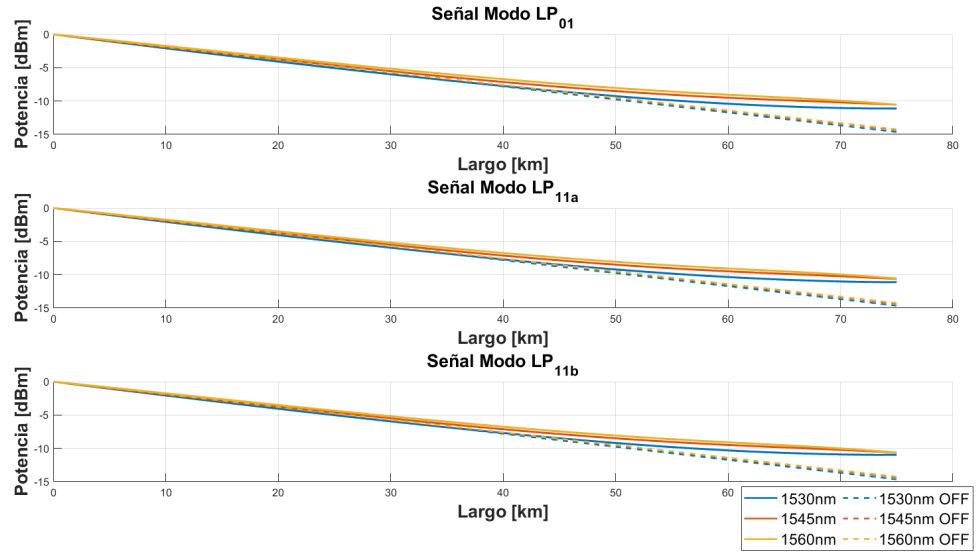


Figura 5.6: Evolución de potencia de señal

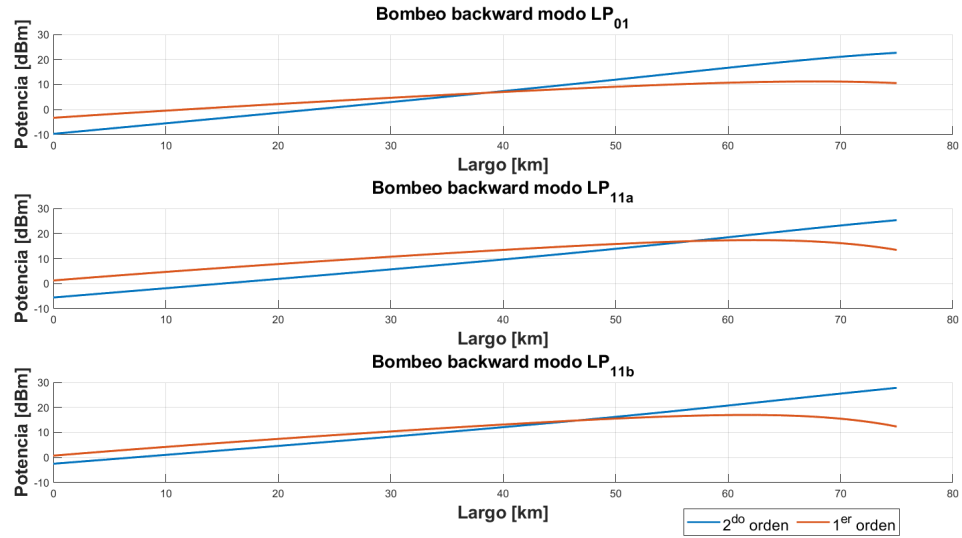


Figura 5.7: Evolución de potencia de bombeo

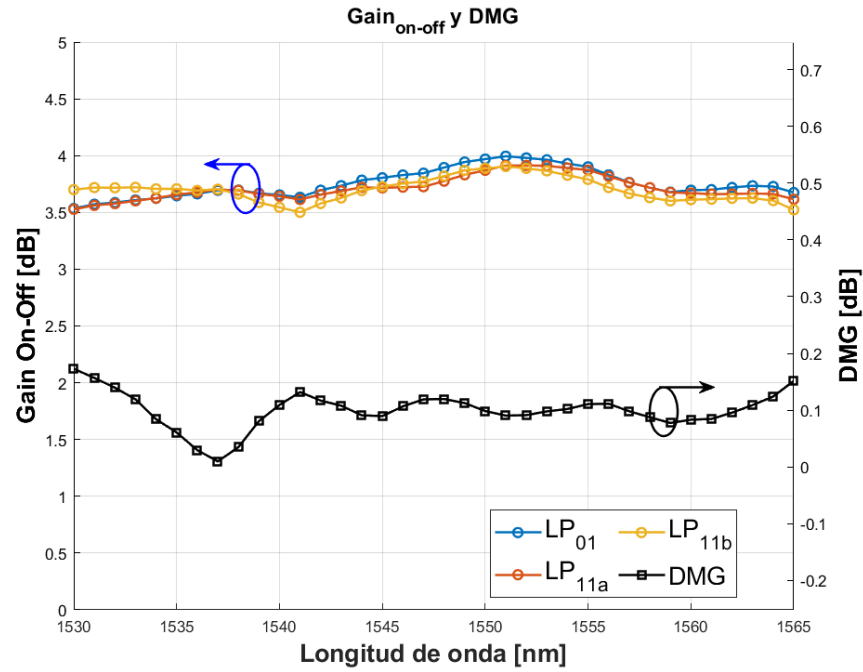


Figura 5.8: Ganancia On-Off y DMG

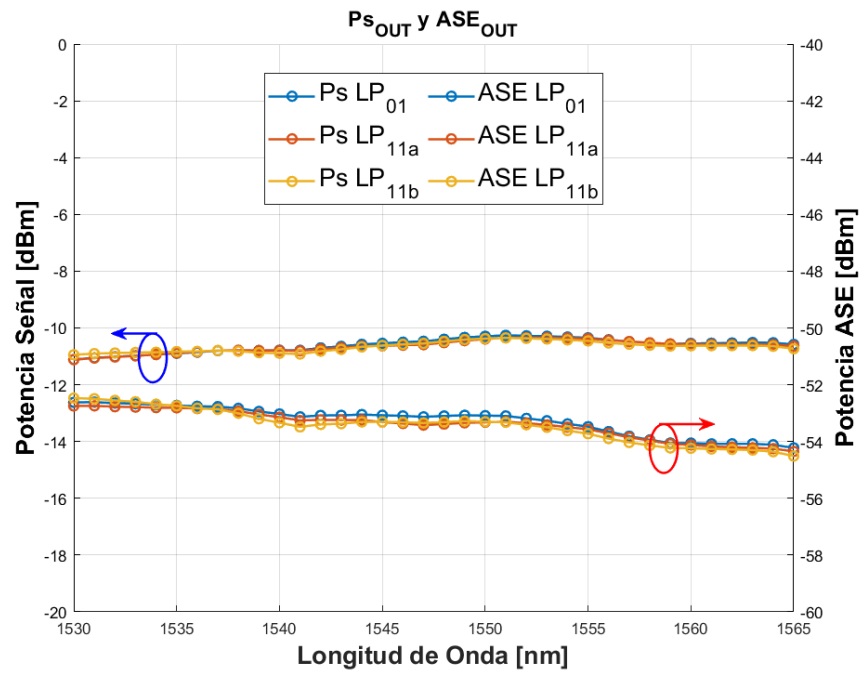


Figura 5.9: Potencia de señal y ASE a la salida del amplificador

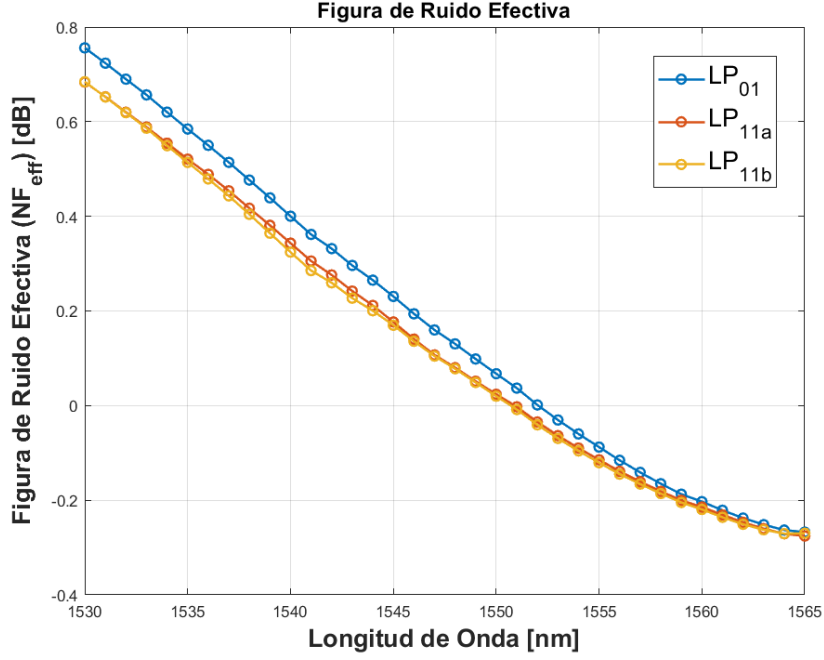


Figura 5.10: Figura de ruido efectiva

Los resultados obtenidos para este segundo caso muestran mejoras significativas en comparación con el caso anterior. En particular, se observa una reducción en el DSG, lo cual indica una mayor uniformidad espectral en la amplificación. Si bien el DMG presenta un leve aumento de aproximadamente 0.1 dB respecto al primer caso, los valores alcanzados siguen siendo adecuados para una operación balanceada entre modos. A continuación, se detallan los resultados obtenidos tras aplicar el perfil de bombeo optimizado.

Luego de la optimización se obtiene una variación en la ganancia de 0.4608, 0.3862 y 0.4033 dB para los modos LP_{01} , LP_{11a} y LP_{11b} respectivamente. Con respecto al DMG, se obtiene un valor máximo de 0.1730 dB entre el modo LP_{11a} y LP_{11b} .

Por último se observa una figura de ruido efectiva entre 0.8 y -0.2 dB en el ancho de banda de señal.

5.3 Optimización de DSG y DMG en bombeo de segundo orden con 6 modos de propagación

En este caso de estudio se amplió a la propagación de 6 modos (LP_{01} - LP_{11a} - LP_{11b} - LP_{21a} - LP_{21b} - LP_{02}) manteniendo las longitudes de onda de bombeo en 1360 nm y 1455

nm, ya que la ejecución tomaba mucho más tiempo, por tanto tener que utilizar longitud de onda variable tomaría mucho en alcanzar la convergencia.

5.3.1 Caso 1: 3 Modos de Bombeo

En este caso se decide bombear los modos LP_{21a} , LP_{21b} y LP_{02} utilizando 31 canales entre 1530-1560 [nm] utilizando el mismo bombeo de segundo orden anteriormente usado. Se decidió el uso de esos modos de bombeo ya que presentan mejor integral de solapamiento 2.20 entre todos los modos.

Límites de Potencia		
	Longitud de onda 1360 [nm]	Longitud de onda 1455 [nm]
Potencia LP_{02} [mW]	[200-600]	[5-60]
Potencia LP_{21a} [mW]	[300-600]	[10-60]
Potencia LP_{21b} [mW]	[300-600]	[10-60]

Tabla 5.7: Límites potencia algoritmo genético

Solución encontrada		
	Longitud de onda 1360 [nm]	Longitud de onda 1455 [nm]
Potencia LP_{02} [mW]	474.6	14.8
Potencia LP_{21a} [mW]	398.5	26.4
Potencia LP_{21b} [mW]	360.9	24.3

Tabla 5.8: Solución encontrada potencia algoritmo genético

Con dicho perfil de bombeo para cada modo en particular se generan los siguientes resultados mostrados en las Figuras 5.11,5.12,5.13,5.14 y 5.15.

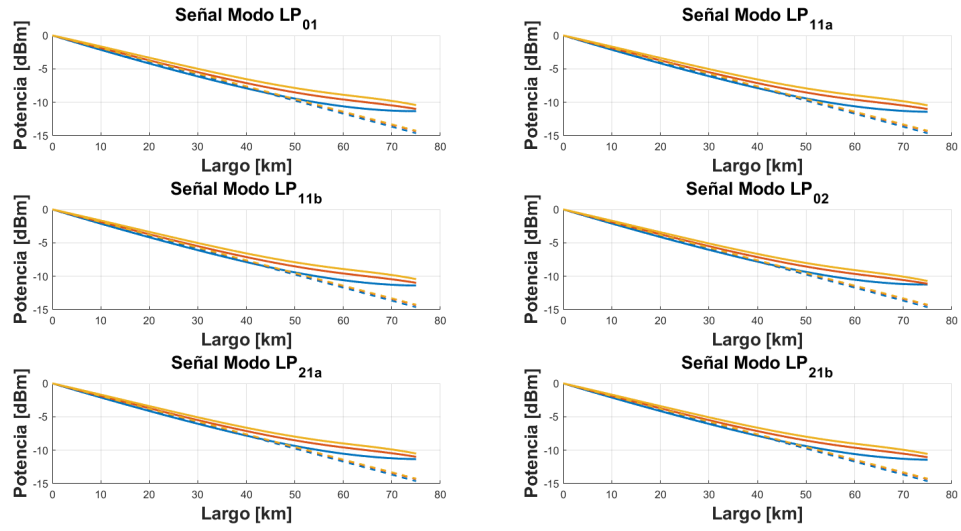


Figura 5.11: Evolución de potencia de señal

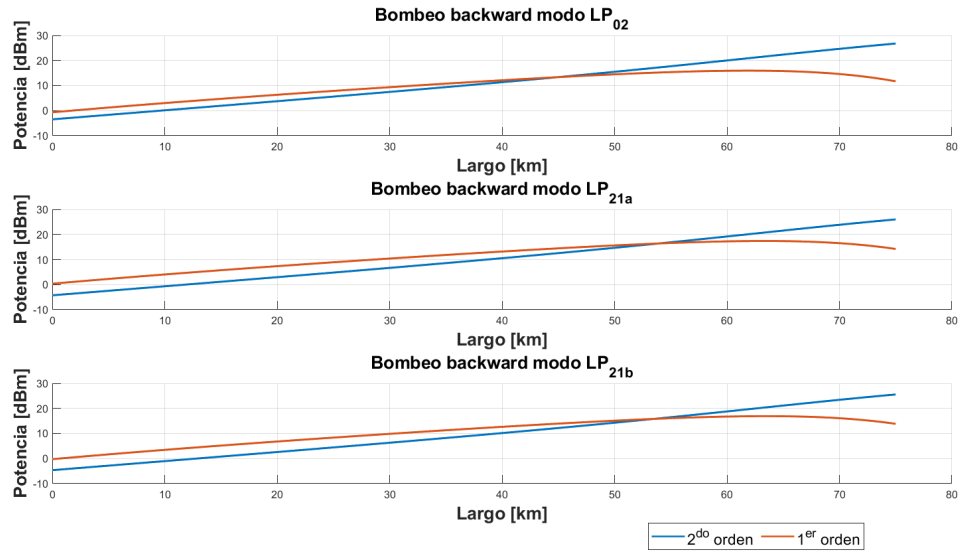


Figura 5.12: Evolución de potencia de bombeo

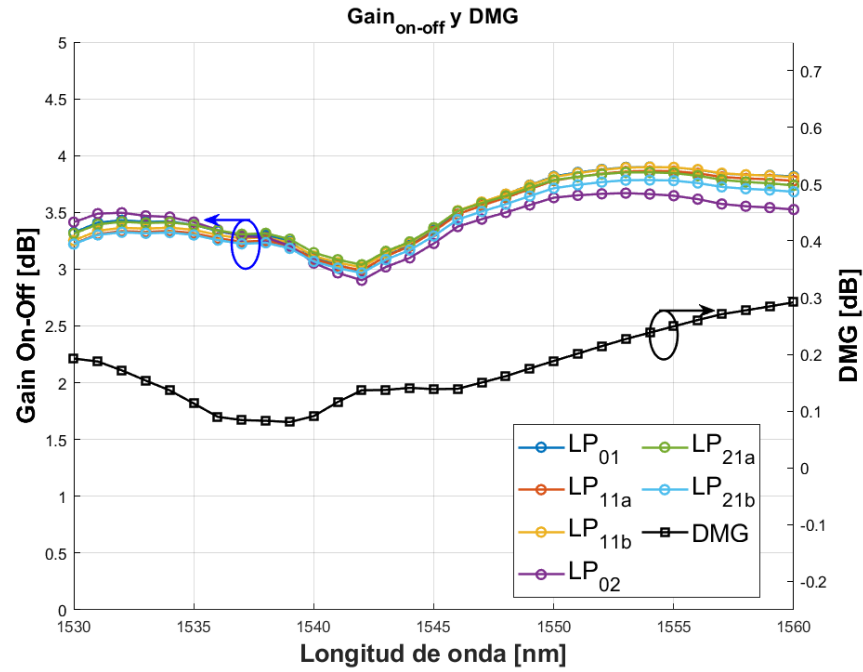


Figura 5.13: Ganancia On-Off y DMG

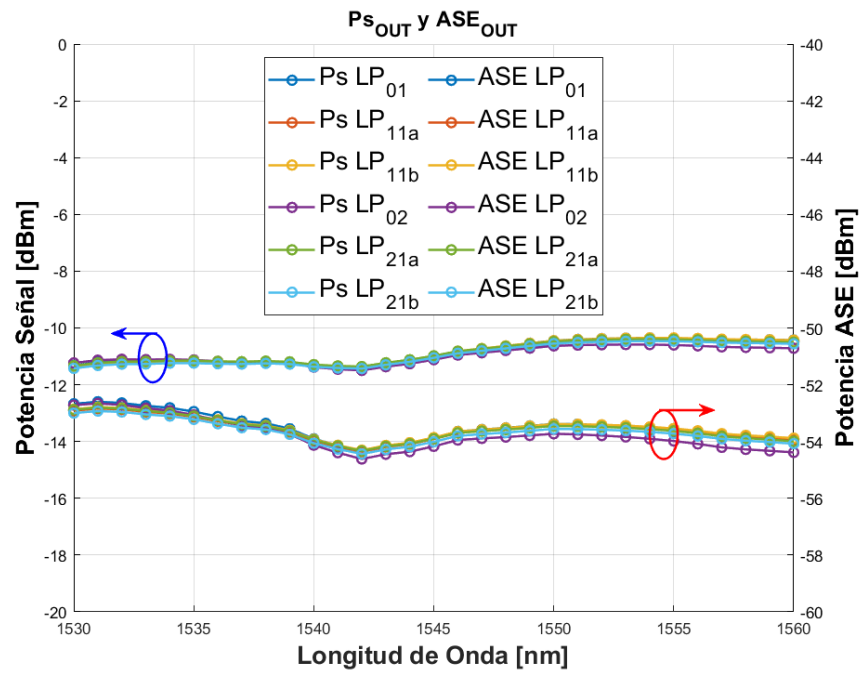


Figura 5.14: Potencia de señal y ASE a la salida del amplificador

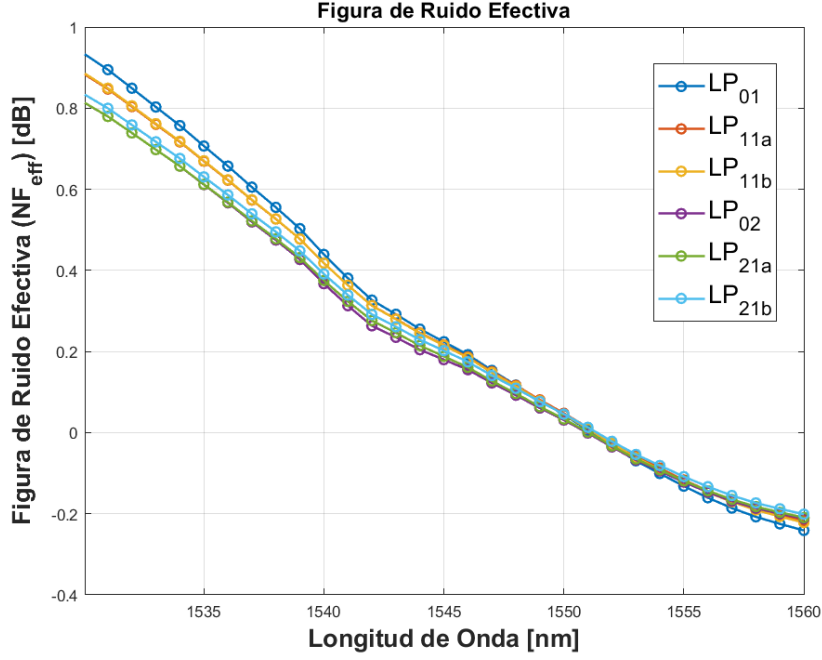


Figura 5.15: Figura de ruido efectiva

Como se observa en la Figura 5.11, el efecto del bombeo de segundo orden es particularmente evidente en las longitudes de onda mayores, donde se aprecia una mayor amplificación de la señal. Además, en la Figura 5.13 se puede notar una mayor variación en el DSG en comparación con los casos anteriores, lo que sugiere una sensibilidad mayor al número de modos propagantes cuando se utilizan perfiles de bombeo fijos. Por otro lado, la Figura 5.15 muestra que la figura de ruido efectiva se mantiene dentro de un rango de 1 a -0.2 dB, similar al observado en el caso de tres modos de propagación, donde el rango fue de 0.8 a -0.2 dB, lo que indica que la estabilidad del ruido se conserva a pesar del aumento en complejidad modal.

Luego de la optimización se obtiene una variación en la ganancia de 0.9145, 0.8757, 0.8823, 0.7676, 0.8136 y 0.8185 dB para los modos LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b} , LP_{21a} , LP_{21b} y LP_{02} respectivamente. Con respecto al DMG, se obtiene un valor máximo de 0.2917 dB entre el modo LP_{01} y LP_{02} .

5.4 Conclusión

En este capítulo se presentaron tres casos de estudio que analizaron el comportamiento de amplificadores ópticos Raman-FMF.

La optimización de la potencia de bombeo para amplificadores Raman de segundo

orden con varios modos de propagación (3 y 6 modos) muestra que la estrategia de minimizar simultáneamente el DSG (dispersión de ganancia en un mismo modo) y el DMG (dispersión de ganancia entre modos) puede lograrse de forma efectiva mediante algoritmos genéticos.

En el caso de tres modos de señal (LP_{01} , LP_{11a} y LP_{11b}), la ganancia On-Off resultante presenta una variación inferior a 1 dB a lo largo de la banda C (1530–1565 nm) y se logra mantener la figura de ruido en valores comprendidos entre aproximadamente 0.8 y -0.2 dB para la mayoría de los canales. Al permitir la variación de la longitud de onda de bombeo (además de la potencia), se observa una reducción adicional en la diferencia de ganancia (a valores menores de 0.5 dB) con menos de 0.1 dB de DMG extra, confirmando la importancia de ajustar de manera conjunta ambos parámetros (longitud de onda y potencia).

Por otro lado, al extender el sistema a seis modos de señal (LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b} , LP_{02} , LP_{21a} y LP_{21b}), se mantiene la posibilidad de obtener una ganancia promedio estable en la región de interés, aunque con una dispersión de ganancia algo mayor (valores cercanos a 1 dB), propia de la mayor complejidad multimodal. No obstante, el DMG máximo observado sigue siendo relativamente pequeño (en el orden de 0.3 dB), y la figura de ruido se mantiene en rangos similares (entre 1 y -0.2 dB).

Por último, la Figura 5.15 muestra que la NF_{eff} se mantiene dentro de un rango de 1 a -0.2 dB. Si bien este valor máximo es ligeramente superior al observado en el caso con tres modos (0.8 dB), la NF_{eff} conserva un comportamiento estable en la mayor parte del ancho de banda. Esto demuestra que, a pesar del incremento en la complejidad modal y las variaciones espectrales, el esquema de bombeo de segundo orden implementado logra mantener una buena eficiencia en términos de ruido, sin comprometer significativamente el desempeño global del amplificador.

Capítulo 6

Conclusión

En este trabajo se implementó en computador el modelo matemático de un amplificador Raman con una fibra de pocos modos, utilizando multiplexación por longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing: WDM) y multiplexación por división espacial (Space Division Multiplexing: SDM) a través de multiplexación de modos (Mode Division Multiplexing: MDM), en el entorno de programación de MATLAB®. Se validó el funcionamiento del amplificador Raman simulado mediante diversas pruebas de bombeo de primer y segundo orden, cuyos resultados muestran concordancia con lo reportado por la herramienta comercial VPIphotonics®.

Además, se desarrolló un algoritmo genético que permite optimizar los principales desafíos presentes en un amplificador óptico Raman distribuido de pocos modos (Few-Mode Distributed Fiber Raman Amplifier: FM-DRFA): la diferencia de ganancia dentro de un mismo modo (Differential Spectral Gain: DSG) y la diferencia de ganancia entre modos (Differential Modal Gain: DMG). Gracias a esta metodología se lograron configuraciones de bombeo que proporcionan soluciones factibles para distintas combinaciones de modos de propagación, demostrando la utilidad de los algoritmos de optimización en el diseño de amplificadores con más de un modo propagándose.

Se evaluaron tres escenarios principales de optimización. En el primer caso, se fijaron las longitudes de onda de bombeo y se optimizó únicamente la potencia. Esta estrategia logró valores bajos de DMG y DSG, destacando una figura de ruido efectiva estable entre -0.2 dB y 0.8 dB. En el segundo caso, se permitió la variación tanto de potencias como de longitudes de onda de bombeo para tres modos de propagación. Este enfoque logró reducir aún más la DSG, aunque el DMG presentó un leve au-

mento (de aproximadamente 0.1 dB), y la NF se mantuvo en rangos similares, con un desempeño equilibrado en todo el ancho de banda. Finalmente, se abordó un caso con seis modos de propagación, manteniendo longitudes de onda fijas debido al mayor costo computacional. Aunque se logró amplificar todos los modos de forma aceptable, la mayor complejidad modal derivó en un aumento del DMG (hasta 0.29 dB) y un mayor DSG (cercano a 1 dB), mientras que la NF se mantuvo dentro de un rango similar al de los casos anteriores (de -0.2 dB a 1 dB).

En términos comparativos, el mejor resultado global en cuanto a DSG y estabilidad de la figura de ruido se obtuvo en el segundo caso (variación de potencia y longitud de onda para tres modos), mientras que el menor DMG se logró en el primer caso con longitudes de onda fijas. Esto evidencia que la libertad de variar ambos parámetros mejora la uniformidad espectral, aunque a costa de un leve compromiso en la ganancia modal.

Como trabajo futuro, es conveniente ampliar el número de canales WDM para analizar el desempeño del amplificador en escenarios de mayor densidad espectral, realizar simulaciones con niveles de potencia de bombeo más altos, integrar nuevos esquemas de bombeo (forward y co-propagante) para comparar el desempeño, optimizar la implementación del amplificador usando diferentes métodos de análisis numérico para reducir el tiempo de ejecución o la integración de Machine Learning para la optimización de la ganancia y por último, añadir efectos que no se han profundizado en este trabajo, tal como Rayleigh y efectos no lineales para acercarlo aún más a la implementación experimental.

Referencias

- [1] Hernán Andrés Soto Ferrada. "ecualización de potencia 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. Master's thesis, USM, 2007.
- [2] Jiaxiong Li, Jiangbing Du, Lin Ma, Ming-Jun Li, and Zuyuan He. Second-order few-mode distributed raman amplifier for mode-division multiplexing transmission. In *2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pages 1–3, 2017.
- [3] Werner Klaus, Peter J. Winzer, and Kazuhide Nakajima. The role of parallelism in the evolution of optical fiber communication systems. *Proceedings of the IEEE*, 110(11):1619–1654, 2022.
- [4] R. Hui and M. O'Sullivan. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Academic Press, 2009.
- [5] J. Bromage. Raman amplification for fiber communications systems. *Journal of Lightwave Technology*, 22(1):79–93, 2004.
- [6] Mark Shtaif, Cristian Antonelli, Antonio Mecozzi, and Xi Chen. Challenges in estimating the information capacity of the fiber-optic channel. *Proceedings of the IEEE*, 110(11):1655–1678, 2022.
- [7] George M. Saridis, Dimitris Alexandropoulos, Georgios Zervas, and Dimitra Simeonidou. Survey and evaluation of space division multiplexing: From technologies to optical networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4):2136–2156, 2015.
- [8] Kunimasa Saitoh and Shoichiro Matsuo. Multicore fiber technology. *Journal of Lightwave Technology*, 34(1):55–66, 2016.

- [9] K. Takenaga, Y. Arakawa, S. Tanigawa, N. Guan, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshiba. Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fiber. In *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–3, 2011.
- [10] Umar Farooque and Rakesh Ranjan. Comparative crosstalk performance analysis of different configurations of heterogeneous multicore fiber. *Journal of Optical Communications*, 45(1):35–46, 2024.
- [11] Marianne Bigot-Astruc, David Boivin, and Pierre Sillard. Design and fabrication of weakly-coupled few-modes fibers. In *2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series*, pages 189–190, 2012.
- [12] T. Sakamoto, K. Saitoh, S. Saitoh, Y. Abe, K. Takenaga, A. Urushibara, M. Wada, T. Matsui, K. Aikawa, and K. Nakajima. 120 spatial channel few-mode multi-core fibre with relative core multiplicity factor exceeding 100. In *2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, pages 1–3, 2018.
- [13] Daiki Soma, Yuta Wakayama, Shohei Beppu, Seiya Sumita, Takehiro Tsuritani, Tetsuya Hayashi, Takuji Nagashima, Masato Suzuki, Hidenori Takahashi, Koji Igarashi, Itsuro Morita, and Masatoshi Suzuki. 10.16 peta-bit/s dense sdm/wdm transmission over low-dmd 6-mode 19-core fibre across c+l band. In *2017 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, pages 1–3, 2017.
- [14] Georg Rademacher, Benjamin J. Puttnam, Ruben S. Luís, Jun Sakaguchi, Werner Klaus, Tobias A. Eriksson, Yoshinari Awaji, Tetsuya Hayashi, Takuji Nagashima, Tetsuya Nakanishi, Toshiki Taru, Taketoshi Takahata, Tetsuya Kobayashi, Hideaki Furukawa, and Naoya Wada. 10.66 peta-bit/s transmission over a 38-core-three-mode fiber. In *2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pages 1–3, 2020.
- [15] Yuta Wakayama, Daiki Soma, Shohei Beppu, Seiya Sumita, Koji Igarashi, and Takehiro Tsuritani. 266.1-tbit/s transmission over 90.4-km 6-mode fiber with in-line dual c+l-band 6-mode edfa. *Journal of Lightwave Technology*, 37(2):404–410, 2019.
- [16] Hitoshi Takeshita, Keiichi Matsumoto, and Emmanuel Le Taillandier de Gabory. Transmission of 200gbps pm-16qam signal through 7-core mcf and mc-edfa using

- novel turbo cladding pumping scheme for improved efficiency of the optical amplification. In *2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, pages 1–3, 2018.
- [17] Jiaxiong Li, Lulu Wang, Jiangbing Du, Zuyuan He, Chengkun Cai, Long Zhu, Andong Wang, and Jian Wang. C + L band distributed few-mode raman amplification with flattened gain for mode-division-multiplexed optical transmission over 75-km few-mode fiber. In *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*, pages 1–3, 2018.
 - [18] Yifan Yu, Lian Xiang, Weidong Shao, Gangxiang Shen, and Wei Sun. Numerical estimation of inter-core crosstalk affected by stimulated raman scattering in weakly coupled multicore fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 2024.
 - [19] Jiaxiong Li, Chengkun Cai, Jiangbing Du, Shoulin Jiang, Lin Ma, Lulu Wang, Long Zhu, Andong Wang, Ming-Jun Li, Hao Chen, Jian Wang, and Zuyuan He. Ultra-Low-Noise Mode-Division Multiplexed WDM Transmission Over 100-km FMF Based on a Second-Order Few-Mode Raman Amplifier. *Journal of Lightwave Technology*, 36(16):3254–3260, 2018.
 - [20] Jiaxiong Li, Lulu Wang, Jiangbing Du, Zuyuan He, Chengkun Cai, Long Zhu, Andong Wang, and Jian Wang. C + L Band Distributed Few-mode Raman Amplification with Flattened Gain for Mode-division-multiplexed Optical Transmission over 75-km Few-mode Fiber. In *2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*, pages 1–3, 2018.
 - [21] Jing ren Qian and Wei ping Huang. Coupled-mode theory for lp modes. *Journal of Lightwave Technology*, 4(6):619–625, 1986.
 - [22] Jing ren Qian and Wei ping Huang. Lp modes and ideal modes on optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 4(6):626–630, 1986.
 - [23] A. Gatto, P. Martelli, P. Parolari, N. Sambo, P. Castoldi, and P. Boffi. Mode group division multiplexing in 5 mode-group fmf enabling mimo-free solutions. *IEEE Photonics Technology Letters*, 34(21):1167–1170, 2022.
 - [24] Ewen Smith and Geoffrey Dent. *Modern Raman spectroscopy: a practical approach*. John Wiley & Sons, 2019.
 - [25] C. Headley and G.P. Agrawal. *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems*. Electronics & Electrical. Elsevier Science, 2005.