



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DEL ESPARCIMIENTO BRILLOUIN
ESTIMULADO EN 25 KM DE FIBRA ÓPTICA SMF-28**

**TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO EN REDES**

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN REDES

**PRESENTA
ALFREDO ALEJANDRO YAM**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. HOMERO TORAL CRUZ**

**ASESORES
M.C. RAFAEL SÁNCHEZ LARA
M.C. FRANCISCO MÉNDEZ MARTÍNEZ
DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC
DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA**



**UNIVERSIDAD DE
QUINTANA ROO
CONTROL ESCOLAR
TITULACIONES**





UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS TITULADO
"CARACTERIZACIÓN DEL ESPARCIMIENTO BRILLOUIN ESTIMULADO EN 25 KM
DE FIBRA ÓPTICA SMF-28"

ELABORADO POR
ALFREDO ALEJANDRO YAM

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE:

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN REDES

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:


DR. HOMERO TORAL CRUZ

ASESOR:


M.C. RAFAEL SÁNCHEZ LARA

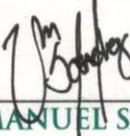
ASESOR:

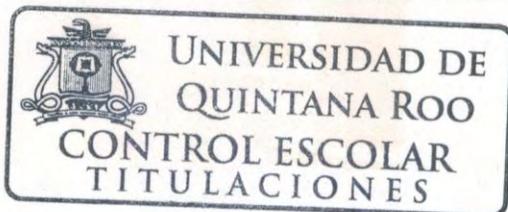

M.C. FRANCISCO MÉNDEZ MARTÍNEZ

ASESOR:


DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC

ASESOR:


DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA



DEDICATORIA

DEDICATED

To

My Family

My Mother Marleny Isabel Chan

A strong and gentle soul who has taught me to trust in God, believe in hard work and that so much could be done
with little

My Father Efrain Alfredo Yam

For believing in me and helping me in any way possible to attain my goals

My Sister Helen Elizabeth Yam

I know you are proud of me and I hope to be the best brother you ever wanted.

I love you all!

God Bless you all!

AGRADECIMIENTO

God almighty is worthy of all my acknowledgment and gratitude!

I wish to express my most sincere thanks to my parents for believing in me and always supporting me in every aspect of my life. We all know what we went by while walking through this journey. I know I had to limit you all in every aspect in order for this to become a reality and today here it's outcome! I'm deeply grateful mom and Dad!

This is the best heritage you could ever gave me! Thank you from the bottom of my heart!

A special thanks for my girlfriend Ceshia Kedusha Mendoza Torres for being my unconditional friend and being there when every I needed and giving all your effort in every aspect of my life! God bless you!

My most sincere gratitude to my professor Dr. Homero Cruz Toral, for being there and supporting me in every aspect and giving me opportunities which eventually changed my life as a student. I'm so grateful Dr. Toral for giving the extra mile and giving your time and finding ways for things to work.

To Dr. Rafael Sanchez Lara for giving me advices and providing his time to make this thesis a reality. Thank you for your patience and helping me in every aspect through the process of this thesis. I honestly give you my sincere gratitude Dr.! Thank you for explaining and guiding me.

To Dr. Manuel May Alarcon for providing me knowledge on the field of Fiber Optics which I clearly didn't had any idea of at your courses. My most sincere gratitude.

Contenido

INDICE DE FIGURAS	8
INDICE DE TABLAS	9
CAPITULO 1: INTRODUCCION	10
1.1 INTRODUCCIÓN	11
1.2 OBJETIVO GENERAL	12
1.3 OBJETIVOS PARTICULARES	12
1.4 METODOLOGÍA	12
1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO	13
CAPITULO 2: LAS FIBRAS OPTICAS	14
2.1 TRANSMISIÓN POR FIBRAS	15
2.2 LA EVOLUCIÓN DE LAS FIBRAS ÓPTICAS	15
2.3 ÓPTICA GEOMÉTRICA	18
2.4 REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ	18
2.5 APLICACIONES DE LAS FIBRA ÓPTICAS	20
2.6 TIPOS DE FIBRAS	21
2.6.1 Fibras Monomodo	21
2.6.2 Fibras Multimodo de Índice Escalonado	22
2.6.3 Fibras Multimodo de Índice Gradual	22
2.7 DEGRADACIÓN DE LA SEÑAL EN FIBRAS ÓPTICAS	23
2.8 ATENUACIÓN	23
2.8.1 Pérdidas por Scattering	23
2.8.1.1 Scattering Rayleigh.....	24
2.8.1.2 Scattering Mie	24
2.8.2 Absorción Material.....	24
2.8.2.1 Pérdidas Intrínsecas	24
2.8.2.2 Pérdidas Extrínsecas	25
2.8.3 Pérdidas por Acoplamiento.....	25
2.8.4 Pérdidas Debido a Imperfecciones en la Fibra.....	26
2.9 DISPERSIÓN	26
2.9.1 Dispersión Modal	27
2.9.2 Dispersión Intermodal.....	27
2.9.3 Dispersión Cromática.....	28

2.9.4	Dispersión por Modo de Polarización	28
2.10	CAPACIDAD DE TRASMISIÓN	28
CAPITULO 3: LOS FENÓMENOS NO LINEALES EN LA FIBRA ÓPTICA.....		29
3.1	EFFECTOS NO LINEALES.....	30
3.2	NO LINEALIDADES	30
3.3	SCATTERING NO LINEAL	32
3.4	EFFECTO KERR.....	32
3.5	CHIRP	33
3.6	MODULACIÓN DE FASE INDUCIDA (SELF-PHASE MODULATION)	33
3.7	MODULACIÓN DE FASE CRUZADA (CROSS-PHASE MODULATION).....	34
3.8	MEZCLA DE CUATRO ONDAS (FOUR WAVE MIXING).....	35
3.9	ESPARCIMIENTO ESTIMULADO DE RAMAN	36
3.10	ESPARCIMIENTO ESTIMULADO DE BRILLOUIN.....	38
3.11	DIFERENCIA ENTRE ESTIMULADO DE RAMAN Y ESTIMULADO DE BRILLOUIN	39
3.12	EFFECTOS NO LINEALES Y SU RELACIÓN CON LOS PARÁMETROS DE TRASMISIÓN ...	40
CAPITULO 4: EL ESPARCIMIENTO BRILLOUIN ESTIMULADO EN LA FIBRA ÓPTICA		41
4.1	CONCEPTOS BÁSICOS.....	42
4.2	TEORÍA BÁSICA	42
4.3	ELECTROSTRICCIÓN	43
4.4	PROCESO FÍSICO	45
4.5	ESPECTRO DE GANANCIA BRILLOUIN.....	47
4.6	UMBRAL DE BRILLOUIN.....	48
CAPITULO 5: CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DEL EFFECTO SBS		50
5.1	INTRODUCCIÓN.....	51
5.2	ARREGLO ÓPTICO.....	51
5.3	LÁSERES	52
5.4	MULTIPLEXOR.....	54
5.5	EDFA.....	55
5.6	CIRCULADOR	55
5.7	FIBRA SMF-28	56
5.8	ANALIZADOR DE ESPECTRO ÓPTICO	57
CAPITULO 6: RESULTADOS		59
CONCLUSIONES		66
GLOSARIO.....		67

ACRÓNIMOS	69
REFERENCIAS	70
APÉNDICE 1 HOJA DE DATOS DE FIBRA SMF-28	71
APÉNDICE 2 HOJA DE DATOS DE ANALIZADOR DE ESPECTRO ÓPTICO	72
APÉNDICE 3 HOJA DE DATOS DE LASER ITC510	73
APÉNDICE 4 HOJA DE DATOS DE LASER THORLABS S3FC 1550	74

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 ESTRUCTURA DE UNA FIBRA	17
FIGURA 2 REFRACCIÓN DE LA LUZ EN LA FIBRA	19
FIGURA 3 REFLEXIÓN DE LA LUZ EN LA FIBRA	20
FIGURA 4 FIBRA MONOMODO	21
FIGURA 5 FIBRA MULTIMODO DE ÍNDICE ESCALONADO.....	22
FIGURA 6 FIBRA MULTIMODO DE ÍNDICE GRADUAL	22
FIGURA 7 ESQUEMA DE UNA MICRO DOBLEZ	26
FIGURA 8 CLASIFICACIÓN DE LOS EFECTOS NO LINEALES	31
FIGURA 9 PRODUCTO DE FWM GENERADOS POR TRES PORTADORAS ÓPTICAS.....	36
FIGURA 10 TRANSFERENCIA DE POTENCIA DE LA SEÑAL EN LONGITUD DE ONDA MENORES A LAS MAYORES.....	37
FIGURA 11 FRECUENCIAS DE RAYLEIGH, RAMAN, BRILLOUIN.....	39
FIGURA 12 REPRESENTACIÓN ESQUEMATIZADA DEL PROCESO SBS.....	43
FIGURA 13 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL PROCESO DE ELECTROSTRICCIÓN EN FIBRAS ÓPTICAS. LA PRESENCIA DE FORMA CONJUNTA DE UNA ONDA DE BOMBEO (E_p) Y UNA ONDA STOKES (E_s) PRODUCEN UNA VARIACIÓN DE PRESIÓN ELECTROSTRICATIVA P_{ST} QUE SE TRADUCE EN UNA ONDA SONORA CARACTERIZADA POR UNA VARIACIÓN LOCAL DE DENSIDAD $\Delta\rho$ Y POR ELLO TAMBIÉN DE SU ÍNDICE DE REFRACCIÓN EFECTIVO n_{eff}	44
FIGURA 14 EXPLICACIÓN DEL FENÓMENO DE ELECTROSTRICCIÓN	45
FIGURA 15 (A) FENÓMENO DEL ESPARCIMIENTO ESPONTANEO DE BRILLOUIN (B) FENÓMENO DEL ESPARCIMIENTO ESTIMULADO DE BRILLOUIN	47
FIGURA 16 ARREGLO ÓPTICO DISEÑADO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL ESPARCIMIENTO BRILLOUIN ESTIMULADO	51
FIGURA 17 IMPLEMENTACIÓN DEL ARREGLO ÓPTICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL ESPARCIMIENTO BRILLOUIN ESTIMULADO.....	52
FIGURA 18 LASER THORLABS ITC 510 LASER DIODE COMBI CONTROLLER (LASER A 950NM).....	53
FIGURA 19 THORLABS S3FC FIBER COUPLED DFB LASER SOURCE (LASER A 1550NM)	54
FIGURA 20 EL WDM UTILIZADO EN EL ARREGLO ÓPTICO PARA UNIR LAS DOS SEÑALES DE LOS LÁSERES PARA HACER LA CONEXIÓN CON EL EDFA	55
FIGURA 21 CLASIFICACIONES DE SALIDA DEL CIRCULADOR.....	56
FIGURA 22 CIRCULADOR UTILIZADO PARA TENER LAS MEDICIONES EN LA SALIDA 2 Y 3	56
FIGURA 23 25KM DE FIBRA SMF-28 BARE FIBER SPOOL UTILIZADO	57
FIGURA 24 ANALIZADOR DE ESPECTRO ÓPTICO UTILIZADO PARA VER LAS MEDICIONES DE LA MARCA YOKOGAWA.....	58
FIGURA 25. GRAFICAS DE PRUEBAS TOMADA EN 3 DIFERENTES PUNTOS DONDE SE OBSERVA LA POTENCIA DE BOMBEO MÍNIMA PARA OBTENER EL STOCK BRILLOUIN	60
FIGURA 26. GRAFICAS DE PRUEBAS, DONDE SE OBSERVA LA POTENCIA DE BOMBEO, LA POTENCIA DE BOMBEO RESIDUAL Y EL DESARROLLO DEL STOCK DE BRILLOUIN	61
FIGURA 27. GRAFICAS DE PRUEBAS, DONDE SE OBSERVA LA POTENCIA DE BOMBEO, LA POTENCIA RESIDUAL Y EL STOCK DE BRILLOUIN TOMANDO CASI LA FORMA DEL STOCK DE RAYLEIGH.....	62
FIGURA 28. GRAFICAS DE PRUEBAS, DONDE SE OBSERVA LA POTENCIA DE BOMBEO, POTENCIA DE BOMBEO RESIDUAL Y LA POTENCIA RESIDUAL DONDE EL STOCK DE BRILLOUIN ES MAYOR.	63
FIGURA 29. GRAFICAS DE PRUEBAS, DONDE SE OBSERVA LA POTENCIA DE BOMBEO, POTENCIA DE BOMBEO RESIDUAL Y LA POTENCIA REFLEJADA LA CUAL EL STOCK DE BRILLOUIN ES MAYOR Y EL STOCK DE RAYLEIGH ES MUY PEQUEÑA.....	64
FIGURA 30. UMBRAL DE RAYLEIGH Y BRILLOUIN	65
FIGURA 31 EVOLUCIÓN DE LAS POTENCIAS RESPECTO A LA POTENCIA DE BOMBEO SUMINISTRADA AL INICIO DE LA FIBRA (SOLUCIÓN EXPERIMENTAL)	65

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 TABLA DE APLICACIONES DE LAS FIBRAS ÓPTICAS.....	20
TABLA 2 TABLA DE LOS DIFERENTES MEDIOS DE TRANSMISIÓN.....	28
TABLA 3 DIFERENCIA ENTRE LOS DIFERENTES FENÓMENOS.....	40

CAPITULO 1: INTRODUCCION

1.1 INTRODUCCIÓN

Los Efectos Ópticos No Lineales son el resultado de la interacción de la luz y el medio o material de transmisión. Estos efectos no lineales son la respuesta de cualquier dieléctrico cuando se expone a intensos campos electromagnéticos, por tanto, las fibras ópticas no son la excepción de sufrir estos efectos. Se han descubierto varios efectos no lineales en las fibras de sílice fundido, y cada uno ellos afectan de manera diferente a los sistemas ópticos de transmisión.

Estas no linealidades aparecen básicamente por dos mecanismos.

Un mecanismo se debe a niveles de potencias altas que a través del fenómeno de dispersión causa el esparcimiento Brillouin estimulado (SBS) y el esparcimiento Raman estimulado (SRS).

El otro mecanismo es por la dependencia del índice de refracción del vidrio con la potencia óptica a través del material. Los efectos no lineales producidos por este mecanismo de dependencia del valor del índice de refracción con la potencia, son efectos de modulación denominados Auto-Modulación de Fase (SPM: Self-Phase Modulation), Modulación de Fase Cruzada (XPM: Cross-Phase Modulation), y Mezclado de 4ª. Onda (FWM).

Estos fenómenos pueden presentar ventajas o desventajas; por ejemplo, en los sistemas de telecomunicaciones por fibra óptica, el SBS es el principal limitante en la potencia de transmisión por canal, pero también se ha usado como sensor, por ello la importancia de caracterizar este fenómeno.

En este trabajo se realizó un estudio experimental de unos de los fenómenos no lineales, el Esparcimiento Brillouin Estimulado (SBS) en fibra óptica SMF-28 utilizado comúnmente en las telecomunicaciones. Es decir, se caracterizará la potencia del Stokes Brillouin generado a diferentes distancias de la fibra óptica. La potencia de mayor importancia es el denominado Umbral de potencia de Brillouin, la cuál es la principal limitante en la potencia de transmisión de los sistemas de comunicaciones ópticos, el umbral de potencia es la potencia del canal de bombeo en el origen de la fibra cuando la potencia del Stokes en el origen de la fibra iguala a la potencia de bombeo residual en el extremo de la misma; otro criterio para hallar el umbral de potencia es en el punto de inflexión de la curva de potencia de Stokes Brillouin. Otro dato interesante es la distancia a la que potencia se obtiene el umbral de Brillouin.

El efecto SBS normalmente se obtiene con potencias de bombeo pequeñas, por tal motivo, se requiere de un láser a 1550nm.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Evaluar mediante experimentación la potencia del componente Stokes generado por Esparcimiento Brillouin Estimulado en 25 km de fibra óptica SMF-28 con canal de bombeo a 1550nm.

1.3 OBJETIVOS PARTICULARES

- Encontrar cuál es la potencia de bombeo mínima para la cual aparece el Stokes Brillouin Estimulado en un tramo de 25 Km de SMF-28.
- Obtener la evolución de la potencia de bombeo residual y componente de Stokes Brillouin con respecto a la variación de la potencia de bombeo en un tramo de 25 Km de fibra SMF-28.
- Obtener el umbral de potencia de bombeo del Stoke Brillouin.

1.4 METODOLOGÍA

El proceso a seguir para realizar este trabajo se muestra a continuación:

-Estudio teórico de los fenómenos no lineales que interactúan en la fibra óptica, profundizando el fenómeno SBS, con el objetivo de conocer sus principales características.

-Construcción de la configuración experimental que consta de un láser de bombeo a 1550nm, un amplificador óptico dopado con Erblio, un láser a 980nm, 25 Km de fibra óptica SMF-28, un circulador óptico, un multiplexor óptico, un Analizador de espectro óptico (OSA), empalmadora y herramientas de corte de fibra.

-Caracterización de las potencias de bombeo del láser de 1550nm.

-Medición de las potencias en el origen de la fibra mediante el OSA para extraer las señales de SBS y Esparcimiento Rayleigh, variando la potencia del canal de bombeo a 1064nm, y distancias de fibra óptica.

-Procesar y analizar los datos de medición obtenidos con el OSA mediante software matemático ORIGIN para poder extraer las potencias críticas.

-Redacción del documento de tesis.

1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El capítulo 2 presenta una introducción de las características principales de las fibras ópticas.

En el capítulo 3 se estudian los principios teóricos de los principales fenómenos no lineales que se presentan en la fibra óptica.

El capítulo 4 presenta un estudio detallado del fenómeno SBS.

En el capítulo 5 se presenta los componentes de la configuración experimental para la medición del efecto SBS.

El capítulo 6 presentará los resultados.

Y finalmente se mostrará las conclusiones.

CAPITULO 2: LAS FIBRAS OPTICAS

2.1 TRANSMISIÓN POR FIBRAS

Para poder entender un poco más sobre el funcionamiento de un sistema de comunicaciones ópticas, en este capítulo se describirá brevemente la historia sobre las comunicaciones ópticas, los conceptos y principios básicos.

Desde los inicios de los tiempos la comunicación ha sido un factor indispensable entre los seres vivos, así como para el uso personal y la subsistencia de la especie. En la actualidad las telecomunicaciones abarcan o engloban todos aquellos sistemas, equipos y métodos que facilitan la transmisión de información, generalmente por métodos electrónicos

Es importante saber las definiciones de Comunicación y Telecomunicación para tener más claro la temática a abordar.

Comunicación: La palabra proviene del latín *communicare*, que significa “compartir algo, poner en común”. Se puede deducir, que la comunicación es un fenómeno inherente a la relación que los seres humanos mantienen cuando se encuentran en un grupo.

Telecomunicación: La palabra telecomunicaciones proviene del griego “tele” que significa “distancia”. Cuando hablamos de telecomunicación nos referimos a la “comunicación a distancia” a un proceso que radica en la transmisión de un mensaje e intercambiar información a otras personas desde un punto a otro. Es la forma de comunicarse con las grandes masas de personas ya sea por la radio, televisión etc. [1]

2.2 LA EVOLUCIÓN DE LAS FIBRAS ÓPTICAS

A continuación se describirá en orden cronológico como ha sido la evolución y el desarrollo de las fibras ópticas:

- 1870 Tyndall demostró que la luz podía ser conducida dentro de un chorro de agua.
- 1880 Alexander Graham Bell estudió la posibilidad de transmitir la palabra en un rayo de luz.
- 1910 Hondros y Debye estudian el aspecto de la guía de onda dieléctrica.
- 1920 Shriever experimenta con la guía de onda dieléctrica.

- 1934 Norman Frech hizo el primer intento de conducir la luz con fines de aplicación, en Estados Unidos. Construyó un teléfono óptico y logra transmitir audio a muy corta distancias utilizando barras de vidrio rígidas.
- 1954 Van Heel, Hopking y Kapany desarrollan la guía de onda dieléctrica recubierta.
- 1958 A. Schalow y C.H. Towne inventan el rayo láser.
- 1959 T. Malman desarrolla la primera aplicación del láser en “Hughes Research Laboratories”.
- 1962 Se desarrollan el LASER semiconductor y fotodiodos semiconductores.
- 1960's Se realizan los primeros experimentos de ondas de luz para transmisión en telecomunicaciones. Charles Kad y G. Hokman sugieren que se utilice la fibra óptica como medio de comunicación. Para esto debería de lograrse una atenuación de 20 dB/Km contra los 1000 db/km que se tenían en el año de 1966.
- 1970 La firma Corning Glass Work obtiene una fibra con atenuaciones de 20 dB/km.
- 1971 Desarrollo del láser de onda continua.
- 1972 El nivel de atenuación de la fibra fabricada entonces llegó a alcanzar valores de 4 dB/km. Desarrollo de fibras con núcleo líquido.
- 1973 Corning desarrolla fibra óptica con atenuación de 2 dB/km.
- 1976 Se instala en Alemania una red de Servicios Integrados (ISDN), con cobertura de 2.1 Km.
- 1977 El MIT desarrolla una fibra con 0.2 dB/km. Experimentos prácticos en Canadá por Bell-Northern.
- 1989 Se ha logrado fabricar Fibra Óptica con niveles de atenuación muy bajos, del orden de 0.16 dB/km y con perfiles de índice de refracción excelentes, lográndose en consecuencia, anchos de banda muy grandes.

Estos grandes avances han ayudado en área de desarrollo de sistemas de telecomunicación óptica. Los fabricantes hoy en día en esta área han alcanzado valores óptimos de rendimiento y son capaces de satisfacer requisitos físicos y de confiabilidad y de seguridad en el área de telecomunicaciones.

Las fibras ópticas hoy en día se han convertido en un medio muy eficaz para transportar señales a lo largo de grandes distancias debido a su baja atenuación, del orden de 0.2 dB/Km. Una fibra óptica está formada por una región central,

con simetría de revolución respecto al eje, llamada núcleo (o core), y una región externa llamada cubierta/revestimiento (o cladding). De acuerdo con las teorías, la luz viaja confinada en el núcleo debido a que el índice de refracción de éste es mayor que el de la cubierta, lo que habilita el fenómeno de reflexión total interna, que impide a los rayos o modos de luz escapar de la región de mayor índice de refracción cuando el ángulo de incidencia en la interfaz núcleo-cubierta supera el valor crítico. Las fibras ópticas estándar están fabricadas con Dióxido de Silicio (SiO_2), o Sílice, que se comporta como un excelente dieléctrico. Para que la región del núcleo tenga un índice de refracción mayor que la cubierta, la Sílice es dopada con diversos elementos. Típicamente los valores del índice de refracción en el núcleo y la cubierta de una fibra son del orden de 1.47 y 1.45 respectivamente. Las fibras se clasifican fundamentalmente en fibras monomodo o multimodo según la presencia de uno o más modos de luz propagándose a través de ella. Esto depende de la diferencia en los índices de refracción, del tamaño del núcleo y de la longitud de onda de la radiación propagante. Cuando en una fibra óptica la intensidad de la radiación confinada supera un cierto umbral, se pueden producir efectos no lineales entre los que se encuentra el de la dispersión Brillouin. Típicamente, las fibras fabricadas para la utilización en telecomunicaciones tienen 9 y 125 μm de diámetro del núcleo y la cubierta respectivamente. [2]

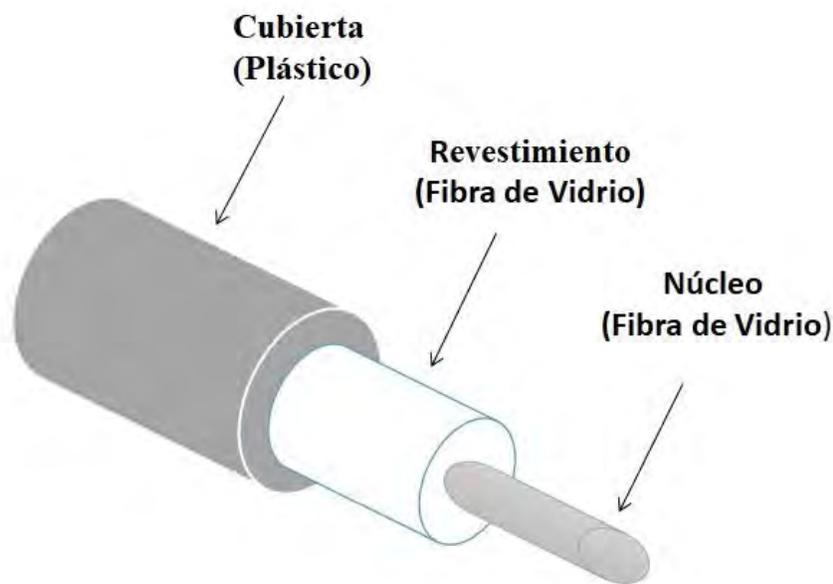


Figura 1 Estructura de una Fibra

2.3 ÓPTICA GEOMÉTRICA

La óptica es el área en física que estudia la luz y sus propiedades. Si solo se estudia las trayectorias de la luz (los rayos), sin considerar la naturaleza física de las ondas electromagnéticas, entonces este estudio pertenece al área de óptica geométrica. La propagación de la luz en una fibra puede ser analizada por medio del uso de leyes de la óptica geométrica.

La luz está compuesta de componentes electromagnéticas que se propagan en el vacío a una velocidad (v) del orden de 300000 km/s. Estas ondas transportan energía y se caracterizan por su frecuencia de oscilación (f), también pueden ser determinados por medio de otro parámetro llamado longitud de onda (λ), esto se define como la relación entre velocidad de propagación y su frecuencia.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad 1$$

Si su longitud de onda está comprendida entre $0.4 \mu\text{m}$ y $0.8\mu\text{m}$, las ondas electromagnéticas tienen la particularidad de poder excitar al ojo humano, y de tal forma pueden ser visibles, dicho esto se le puede denominar como o se designa con el nombre de luz visible.

En un medio dieléctrico (aislante eléctrico), la luz se propaga a una velocidad (v) menor, en comparación con la que alcanza en el vacío (c). La relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad en el dieléctrico se llama índice de refracción del dieléctrico. El índice de refracción (n) es una característica específica del medio.

$$n = \frac{c}{v} \quad 2$$

2.4 REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ

La luz puede reflejarse, transmitirse o refractarse al incidir, esto es con cierto ángulo en la superficie de separación que existe entre dos medios dieléctricos, de diferente índice de refracción. En caso de que ambos medios sean homogéneos y sin pérdidas, como resultado es una división del rayo en dos, uno reflejado y otro refractado, propagándose en cada uno de los medios existentes. El primero lo hará siguiendo una trayectoria que como resultado forma un ángulo con la normal al plano de separación de los medios, igual al de incidencia. Por otra parte, el refractado lo hará de acuerdo a la Ley de Snell:

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2 \quad 3$$

Para el caso de $n_2 > n_1$ (la luz pasa de un medio menos denso a uno más denso), esto se cumplirá para cualquier ángulo de incidencia, por otra parte, mientras que si $n_2 < n_1$ (la luz pasa de un medio más denso a uno menos denso). Para un ángulo de incidencia θ_{1c} , si llegara a cumplir que $\theta_2 = 90^\circ$, entonces la situación cambiaría, lo que es igual a:

$$\text{sen } \theta_{1c} = \frac{n_2}{n_1} \quad 4$$

A este ángulo se le conoce como ángulo crítico, y todos los correspondientes ángulos $\theta_1 > \theta_{1c}$, se encuentran dentro del parámetro que se conoce como reflexión total interna. En este parámetro no existe ningún rayo de luz que se propague por el segundo medio, esto quiere decir que no aparece un rayo refractado, como se muestra en la Figura 2.

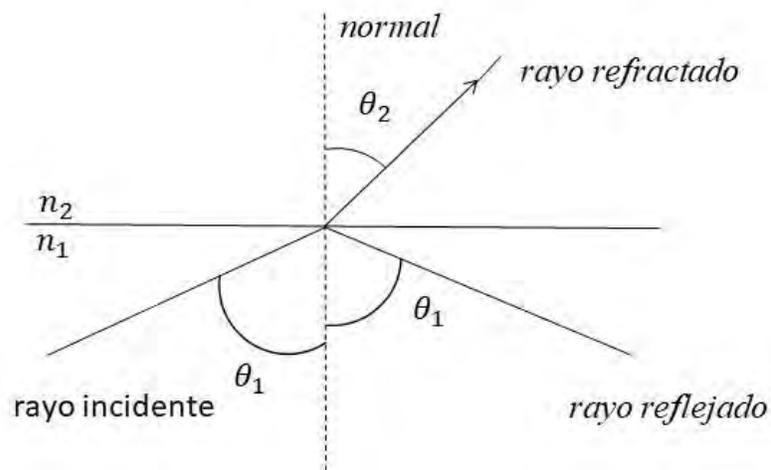


Figura 2 Refracción de la luz en la fibra

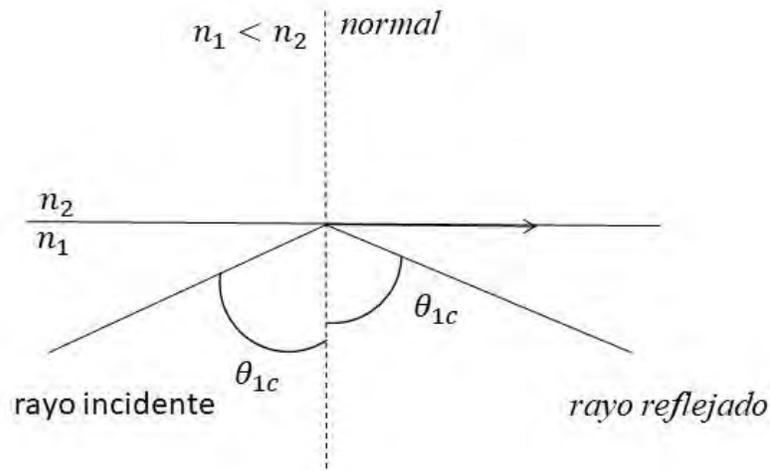


Figura 3 Reflexión de la luz en la fibra

2.5 APLICACIONES DE LAS FIBRA ÓPTICAS

En la actualidad las fibras ópticas tienen una gran gama de aplicaciones en diferentes áreas. Se mencionará a continuación la más importante donde se utilizan las fibras ópticas.

Tabla 1 Tabla de Aplicaciones de las Fibras Ópticas

Área de Aplicación	Característica
Medicina	-Perfeccionó el endoscopio, aparato que permite explorar el cuerpo humano.
Redes telefónicas públicas	-Gran ancho de banda.
Automóviles	-Decrece el peso del cable e incrementa la velocidad de transmisión de signos al tablero.
Sensores (Presión/Temperatura)	-Alta sensibilidad.
Red de T.V. por cable	-Gran ancho de banda.
Comunicaciones en instalaciones de energía eléctrica.	-No hay interferencia electromagnética.
Armas dirigidas.	-Peso pequeño y de ancho de banda grande.
Transmisiones secretas.	-Sin radiación electromagnética.
Control de plantas nucleares.	-Gran ancho de banda sin peligro de incendio y de interferencias electromagnéticas.
Conexión telefónica entre islas por medio de cable submarino.	-Gran ancho de banda y garantiza la comunicación aún en condiciones atmosféricas adversas.

2.6 TIPOS DE FIBRAS

Las fibras ópticas están compuestas de un núcleo de fibra de plástico o vidrio una cubierta y una capa protectora. Para que la luz incidente pueda ser guiado por el núcleo, se basan en el principio de reflexión total. Estas fibras para esto tienen un índice de refracción constante en el núcleo y está cubierta por un revestimiento, la cual tiene un índice de refracción menor al del núcleo. En dado caso que la fibra no tenga revestimiento, esto puede ser aire la cubierta. El valor de n del aire es la unidad y por lo tanto es menor al índice del núcleo. Este caso no es muy usual ya que cuando se lleva a cabo la manipulación para la instalación se pueden generar manchas, ralladuras, contactos con otros medios con índice de refracción, la cual no se tomó en cuenta y otras razones posibles, y esto puede causar un cambio en la reflexión y una “fuga” del rayo de luz.

Las fibras ópticas son clasificados en función de su perfil de índice de refracción, esto puede ser índice gradual o escalonado, y también la cantidad de ratos luminosos (monomodo o multimodo) incidente del núcleo. La fibra en esta clasificación se puede comportarse ya sea como multimodo o monomodo, esto dependiendo de la longitud de onda de la radiación óptica que se propague por la fibra.

2.6.1 Fibras Monomodo

Este tipo de fibra se utiliza principalmente para telecomunicaciones de gran distancia y capacidad. Este tipo de fibra se puede diferenciar físicamente de los demás por unas dimensiones más reducidas de su núcleo en comparación con las otras fibras. Hablando de forma de transmisión, solo se propaga un modo por el núcleo como se verá en la Figura 4. La fibra monomodo con estas características logra una transmisión a frecuencias mayores, que llegan a transmitir hasta 100Gbits/Km [3].



Figura 4 Fibra Monomodo

2.6.2 Fibras Multimodo de Índice Escalonado

El núcleo de estas fibras está constituido de un índice de refracción constante, rodeado por un revestimiento. El índice del revestimiento siempre es menor que el del núcleo con el que hace frontera; en este caso si ocurre dispersión modal.

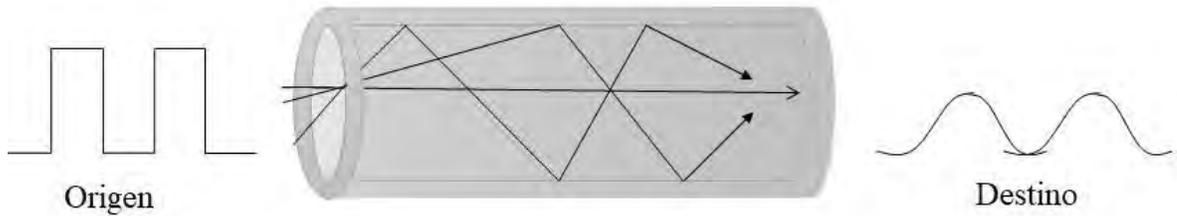


Figura 5 Fibra Multimodo de Índice Escalonado

2.6.3 Fibras Multimodo de Índice Gradual

Este tipo de fibra se utiliza en enlaces de más alta capacidad de información. La diferencia de este tipo de fibra a otras es porque está compuesta por capas cilíndricas con índice de refracción que va variando gradualmente desde el centro con un índice de refracción mayor (máximo) hasta llegar a la cubierta con un menor índice (mínimo). La consecuencia de este arreglo de índices de refracción es que cualquier rayo de luz que se propague por esta fibra va sufriendo una refracción pasando a la capa siguiente, cada vez con un ángulo menor, con respecto al eje, que el que tenía la capa anterior. Periódicamente se repetirá este proceso hasta alcanzar su ángulo crítico sufriendo entonces una reflexión total y dirigirá su trayectoria hacia el centro de la fibra.

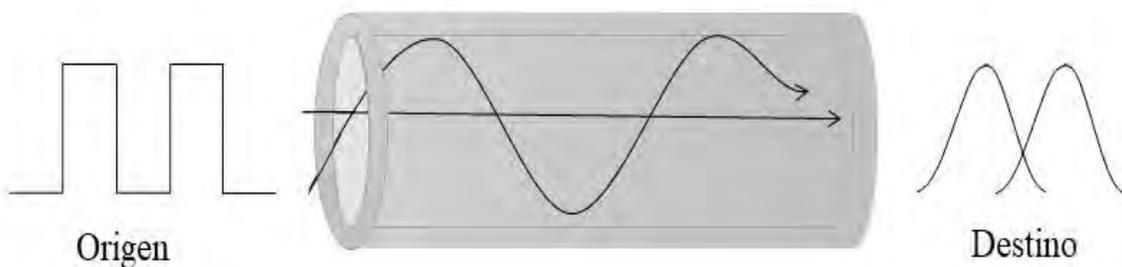


Figura 6 Fibra Multimodo de Índice Gradual

2.7 DEGRADACIÓN DE LA SEÑAL EN FIBRAS ÓPTICAS

En un sistema de comunicaciones ópticas, sabemos que la fibra óptica constituye el canal de transmisión por excelencia. Por tal razón, este canal debe estar en las condiciones de realizar la mejor transmisión posible de una señal óptica. Existen diferentes factores que limitan la capacidad de transporte de información que posee la fibra. Por tal motivo es fundamental el estudio de sus características de propagación y transmisión.

La atenuación de la señal es una de las propiedades más importantes de una fibra óptica debido a que reduce la potencia de la señal que llega al receptor. Por tal razón, el receptor óptico necesita de una cantidad mínima de potencia para que recupere la señal correctamente. Es por eso, que la atenuación determina en gran medida la separación máxima entre el transmisor y el receptor en un sistema de comunicaciones ópticas. Aparte de la atenuación otro factor de igual importancia es la dispersión de la señal, esto genera errores en la salida del receptor y limitando la capacidad de información que puede transmitir la fibra [4].

2.8 ATENUACIÓN

La atenuación de una señal (perdidas en la fibra), se define como la relación que existe entre la potencia óptica de salida de una fibra, con la potencia de entrada. La atenuación que sufre la luz al propagarse a lo largo de la fibra óptica está en función de la longitud de onda, tanto para las fibras monomodo como multimodo. Los mecanismos básicos de atenuación en una fibra son principalmente scattering, absorción y pérdidas debido a imperfecciones en la fibra.

La absorción depende únicamente del material que constituye la fibra, mientras que las otras dos se derivan tanto de este como de las irregularidades existentes en el material.

2.8.1 Pérdidas por Scattering

El material de la fibra no es el único que causa pérdidas en ella, también toda irregularidad estructural, por más pequeño o microscópico que sea, esto hace que la luz que pasa a través de ella experimenta una serie de fenómenos debido primeramente a la interacción de ondas electromagnéticas con las diferentes irregularidades existentes en el material. Como ejemplo pueden ser la composición en el material, espacios huecos, diferencia de densidad. El tipo de interacción variara de acuerdo con la relación existente entre la longitud de onda (λ) de la radiación incidente y el

tamaño de la irregularidad. Cuando λ es mucho menor que dichas irregularidades, se presenta scattering Rayleigh, y si λ es mayor se trata de Scattering Mie.

2.8.1.1 Scattering Rayleigh

Esta pérdida es causada por diminutas fluctuaciones de densidad y variaciones en la concentración molecular de la fibra, tales como burbujas, inhomogeneidades y grietas; procedentes del proceso de fabricación y muy difíciles de eliminar. Scattering Rayleigh es una función inversa a la longitud de onda. Esto implica que es conveniente trabajar a una longitud de onda lo mayor posible. Pero por encima de 1600nm, la absorción infrarroja se vuelve dominante.

2.8.1.2 Scattering Mie

Este tipo de scattering ocurre por inhomogeneidades a lo largo de la longitud de la fibra o imperfecciones en la frontera entre el núcleo y la cubierta. Afortunadamente, la mayor parte de todas estas imperfecciones pueden ser eliminados si se tiene cuidado durante la fabricación. Por ello, este tipo de scattering no suele tomarse en cuenta en las fibras actuales. Si llegara a existir un caso, su repercusión sobre la señal de transmitida no es tan relevante; las pérdidas se encuentran típicamente por debajo de 0.03dB/Km.

2.8.2 Absorción Material

La absorción material puede ser dividida en dos categorías. Las pérdidas intrínsecas corresponden a la absorción causada por el silicio puro (material que se usa para la fabricación de las fibras). Las pérdidas extrínsecas son causadas por las impurezas en la fibra.

2.8.2.1 Pérdidas Intrínsecas

Dado un material específico, debido a su constitución molecular, habrá absorción de la señal a determinadas longitudes de onda. Por moléculas de sílica (SiO_2), ocurren tanto resonancia electrónica en la región ultravioleta ($\lambda < 0.4\mu m$), como resonancias vibratorias en la región de infrarrojo ($\lambda > 7\mu m$). Debido a la naturaleza de la sílica, estas

resonancias se presentan en forma de bandas de absorción cuyas colas se extienden hasta la región de la luz visible. En el rango de longitudes de onda comprendido entre 1300 y 1550 nm, este tipo de absorción no supera los 0.03 dB/Km. Estas pérdidas son las mínimas que podrían aparecer en cualquier tipo de fibra que se fabrique con sílica, independientemente de la tecnología que sea empleada.

2.8.2.2 Pérdidas Extrínsecas

Se originan debido a la presencia de impurezas (también conocidas como pérdida por impureza). Algunas de las impurezas causantes de estas pérdidas son: cobre, hierro, níquel, cromo y magnesio; que son fuertes fuentes de absorción en las bandas de longitudes de onda de nuestro interés. Las técnicas modernas de fabricación han logrado reducir estas pérdidas a valores muy pequeñas para obtener pérdidas menores a 1dB/Km. Pero la principal fuente de absorción extrínseca es la presencia de residuos de vapor de agua durante la fabricación de la fibra (reacción de hidrolisis). Concentraciones equivalentes a 0.003 partes por millón generan pérdidas del orden de los 20 dB/Km; es por ello que la concentración del ion OH contenido en la fibra debe ser reducida a menos de una parte en 100 millones para mantener valores de pérdidas bajos. Sin embargo, este tipo de atenuación no es uniforme en todo el espectro.

2.8.3 Pérdidas por Acoplamiento

Las fibras ópticas tienen una característica importante que es su habilidad de coleccionar luz emitida por una fuente. Cuando se acopla una fuente a una fibra óptica se presentan dos mecanismos de pérdidas, una de ellas está relacionada con el desacoplamiento de áreas, y el otro está relacionada con la apertura numérica.

El desacoplamiento de área se presenta cuando el patrón de radiación de la fuente es más grande con respecto al área transversal del núcleo. Este problema se puede reducir por dos medios existentes: el primero consiste en reducir la distancia entre la fuente y la fibra; el segundo consiste en emplear fuentes con patrones pequeños de radiación y en particular más pequeños que el núcleo.

Aunque el área iluminada por la fuente sea menor que el área del núcleo, existen otras pérdidas asociadas con el hecho de que las fuentes tienen un poco de emisión. Si el cono de emisión de la fuente es más grande que el cono de aceptación de la fibra, la energía del rayo que no sea contenida por el cono de aceptación de la fibra no será acoplada con ella.

2.8.4 Pérdidas Debido a Imperfecciones en la Fibra

Esto es debido principalmente por pérdidas por macro y micro dobleces, así como pérdidas por geometría de la fibra. Los micros dobleces son fluctuaciones (escala pequeña) en el radio de curvatura del eje de la fibra. Esto puede ser causado por uniformidad durante la fabricación de cables o por la presión laterales que se crean durante el cableado de la fibra. Las macro dobleces se refieren al radio de curvatura de la fibra. Al doblar un cable de fibra (principalmente en instalaciones) por debajo del radio mínimo que se especifica por el fabricante puede causar pérdidas (atenuación) durante la transmisión e incluso se puede llegar a romper la fibra que se encuentra dentro del cable [5].

Y por último se pueden presentar pérdidas por geometría de la fibra, esto se relaciona con la concentricidad de la alineación del núcleo con la cubierta, diámetro exterior de la cubierta (determina el tamaño de la fibra) y enrollamiento de la fibra que es el número de curvaturas a lo largo de la longitud de la fibra.

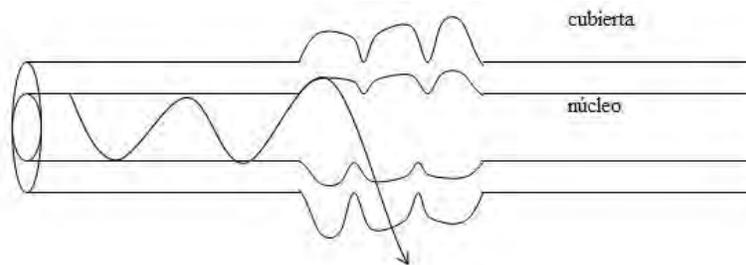


Figura 7 Esquema de una Micro Doblez

2.9 DISPERSIÓN

Se puede realizar una transmisión digital en la fibra óptica, en su caso la información que circula por la fibra tiene la forma de pulsos de luz. En ocasiones, al cero numérico (señal baja) le corresponde una ausencia de luz, mientras que al uno numérico (señal alta) le corresponde una presencia de luz. La información se transmite por secuencias de pulsos luminosos en la fibra, esto da a entender que entre más pulsos luminosos por unidad del tiempo sea posible inyectar, mayor será la capacidad de transmisión de la fibra. Entonces para que la información luminosa pueda utilizarse en un extremo de la fibra, es necesario que la atenuación de la luz no sea demasiado grande, primeramente. Además, que la información no haya sido modificada, de manera que puedan diferenciarse los pulsos. Si en la fibra se llega a producir

un ensanchamiento en la duración de los pulsos luminosos, entonces pueden mezclarse dos pulsos sucesivos diferentes en la entrada de la fibra y con esto hacer que la información se pierda. Este ensanchamiento de los pulsos hace aumentar el tiempo entre dos pulsos sucesivos y por tal motivo reducir el ancho de banda de la modulación en una fibra y como consecuencia la capacidad de transmisión de la información. A este ensanchamiento de los pulsos de luz mientras viajan a lo largo de la fibra óptica se le llama dispersión. [6]

2.9.1 Dispersión Modal

La dispersión modal en una fibra óptica es una característica despreciable, la cual está en función del diámetro del núcleo, frecuencia y la longitud de la fibra óptica. La dispersión modal es una característica despreciable en las fibras ópticas.

La dispersión modal o también conocida como esparcimiento de pulso, es causado por la diferencia en los tiempos de propagación de los rayos de luz, la cual toman diferentes trayectorias por una fibra. Como se sabe este tipo de dispersión solo pueden ocurrir en fibras multimodo. Esto se puede reducir considerablemente usando fibras de índice gradual y esto casi se elimina totalmente si se utiliza fibras de índice escalonado de modo sencillo.

La dispersión modal puede causar que un pulso de energía de luz se disperse conforme se propaga por una fibra. Si el pulso que se está esparciendo es lo suficientemente severo, un pulso puede que caiga arriba del siguiente o próximo pulso. En cuanto a una fibra de índice escalonado multimodo, un rayo de luz que se propaga por el eje de la fibra requiere de la menor cantidad de tiempo para viajar a lo largo de la fibra.

2.9.2 Dispersión Intermodal

En una fibra óptica no todos los modos se propagan siguiendo las mismas trayectorias. Los modos de orden pequeños van en línea recta, mientras que los de orden elevado reciben un gran número de reflexiones totales. Al final de la fibra, la energía de los diferentes modos llega con retraso en tiempo con respecto al modo principal y eso hace que el pulso se ensanche. Esta diferencia de tiempo, que tardan los diferentes modos en recorrer una longitud dada de fibra se le conoce o se le llama dispersión intermodal de una fibra y para las fibras multimodo es significativa.

2.9.3 Dispersión Cromática

La dispersión cromática en un enlace de fibra óptica es acumulativa con la distancia y es sensible tanto a incrementos en el número y la longitud de enlaces por tándem, como incrementos en la tasa de bits (incrementa la tasa de bits, incrementa la tasa de modulación del láser, y a la vez incrementa el ancho de sus bandas espectrales). En un sistema WDM, la dispersión cromática no es significativamente influenciada por incrementos en el número de canales, ni por la reducción de su espaciamiento; pero su control es crítico.

2.9.4 Dispersión por Modo de Polarización

Un factor importante para el ensanchamiento de los pulsos es la llamada birrefringencia; asociada a las componentes de polarización ortogonal del modo fundamental de la fibra. Desde el punto de vista de polarización, dos modos son transportados en una fibra monomodo; un modo dominante que viaja en el eje x y otro modo que viaja en eje y . En condiciones reales las fibras ópticas experimentan considerables variaciones en la uniformidad y forma del núcleo a lo largo de su longitud, y además sufren tensiones de tipo mecánico y estructural que rompen la circularidad del núcleo. En estas condiciones se modifica la orientación de los ejes y la velocidad de propagación correspondientes a cada uno de ellos (directamente relacionado con la magnitud de la birrefringencia local). Si un pulso de entrada excita ambas componentes de polarización, este pulso se ensancha ya que las dos componentes se dispersan a lo largo de la fibra, debido a sus diferentes velocidades de grupo; lo que se conoce como dispersión por modo de polarización (PDM). Las imperfecciones en la fibra pueden incrementar o contrarrestar la PDM; sin embargo, hasta ahora no hay manera de mitigarlo, solo reducirla mediante un estricto control de calidad durante el proceso de fabricación de las fibras. En un sistema de fibra óptica, esta dispersión puede afectar al incremento en la tasa de bits por canal, al incremento en la longitud del enlace, así como al incremento en el número de canales (sistema WDM más denso).

2.10 CAPACIDAD DE TRASMISIÓN

En la siguiente tabla se observará los diferentes tipos de capacidad de información a través de dichos medios:

Tabla 2 Tabla de los diferentes medios de transmisión

Tipo de cable	Capacidad de Transmisión de información
Par sencillo	1MHz-km
Coaxial	100MHz-km
Fibra Óptica	100GHz-km

CAPITULO 3: LOS FENÓMENOS NO LINEALES EN LA FIBRA ÓPTICA

3.1 EFECTOS NO LINEALES

La fibra óptica es un medio propagación no lineal, cuando se propagan señales a baja potencia los efectos no lineales son despreciables, mostrando de manera clara la propagación de la señal. Cuando se incrementa la capacidad, longitudes y el ancho de banda de la fibra óptica, es necesario incrementar la potencia de la señal y/o disminuir las pérdidas de la fibra. Durante este proceso es cuando se hacen notables los efectos no lineales, los cuales limitan la potencia de la señal, no tomando en cuenta la posibilidad de incrementarla indefinidamente.

3.2 NO LINEALIDADES

La presencia de las no linealidades modifica el funcionamiento del sistema conforme se va aumentando la potencia de la señal. Todas estas modificaciones en la señal como consecuencia producen distorsión, interferencia, la acumulación de ruido de cualquier amplificador óptico y atenuación adicional sobre las señales que se propagan, esto llevando degradación en el sistema. Esto también afecta el área efectiva del núcleo de la fibra, número y espaciado de canales ópticos en sistemas multicanal (WDM), ancho de línea de la fuente y la longitud general del sistema sin regeneración. Sin embargo, no siempre serán malos estos efectos, en los últimos años se ha puesto mucha atención e interés en ellos y encontrado ciertas aplicaciones favorables.

En el diseño de sistemas de comunicación por medio de fibra óptica de alta capacidad y largas longitudes, se debe tener en cuenta el hecho que la señal de salida no varié de forma directamente proporcional con la potencia de la señal de entrada, que el espectro de la señal no sea distorsionado y se generen nuevas frecuencias ópticas. Por esta razón se presta atención a los efectos no lineales, los cuales se deben evitar en la medida de lo posible, o por lo menos reducirlo al mínimo, esto es limitando el nivel de la potencia, en otras palabras, poniendo condiciones de máxima potencia, acoplándola con un límite de la razón señal a ruido y un máximo de capacidad.

Las consecuencias de una transmisión no lineal incluyen:

- 1) La generación de señales adicionales dentro del canal.
- 2) Modificaciones de la fase y la forma de los pulsos.
- 3) En otras longitudes de ondas se generan otras luces.
- 4) La interferencia entre señales de longitud de onda.

Los medios ópticos han tenido gran popularidad y atractivo debido a que estos sistemas de comunicación pueden transmitir grandes cantidades de información sobre trayectos largos sin utilizar repetidores. Para poder aprovechar el ancho de banda se puede usar una técnica que se conoce como WDM (Wavelength Division Multiplexing), esto es para aprovechar el ancho de banda disponible al multiplexarse numerosos canales a diferentes longitudes de onda sobre una misma fibra.

Los efectos no lineales, aunque inciden de diferentes formas sobre la transmisión se basan en la interacción de la radiación transmitida con el material por donde se propaga la radiación y responde a dos mecanismos básicos, el primer mecanismo es la variación del índice de refracción del material (en este caso se habla del Sílice) cuando la intensidad de la radiación óptica sobrepasa una determinada potencia, esta variación provoca diferentes fenómenos como la auto modulación de fase inducida (Self-Phase Modulation - SPM), la modulación de fase cruzada (Cross-Phase Modulation - XPM o CPM), la mezcla de cuatro ondas (Four Wave Mixing - FWM). El segundo mecanismo resulta de dos tipos de dispersión: La Dispersión Estimulada de Raman (Stimulated Raman Scattering - SRS) y la Dispersión Estimulada de Brillouin (Stimulated Brillouin Scattering - SBS).

Los efectos no lineales se pueden clasificar en dos grupos:

- 1) Efectos esparcidos (Scattering)
- 2) Efectos no esparcidos con relación al efecto Kerr

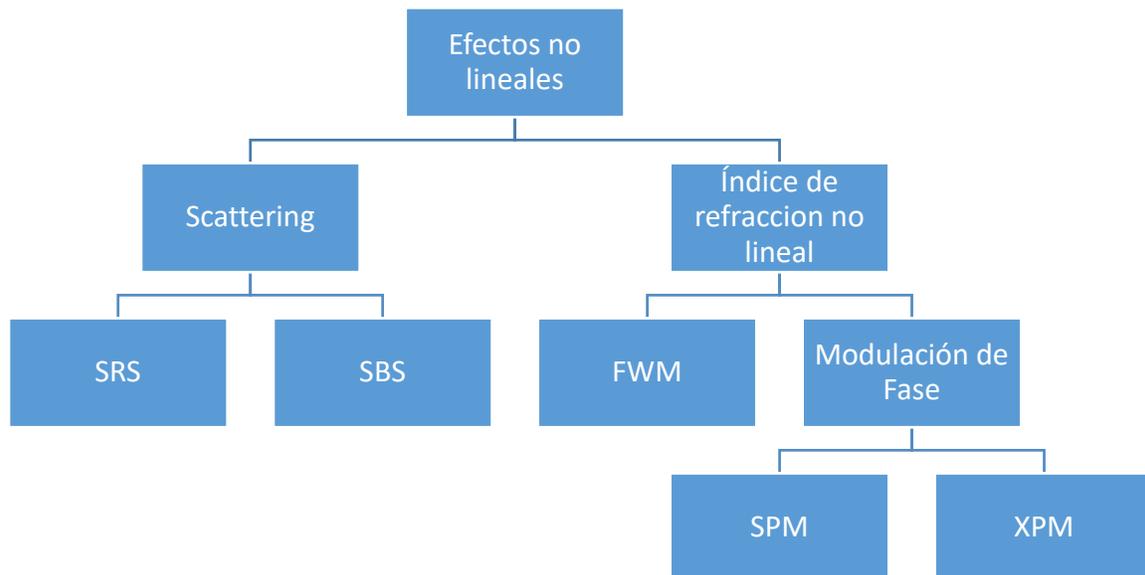


Figura 8 Clasificación de los efectos no lineales

3.3 SCATTERING NO LINEAL

Los efectos no lineales en fibra óptica de tipo no paramétrico son el Scattering Brillouin y el Scattering Raman. El primero de ellos, es la base fundamental de este trabajo, y es el proceso no lineal necesario para la implementación de sensores BOTDA, tal y como se ha mencionado en el Capítulo 1, y el segundo, se emplea para la mejora del rango dinámico de este tipo de sensores.

Los efectos no lineales de tipo no paramétrico, Scattering Raman y Scattering Brillouin, pueden tratarse desde un punto de vista mecánico-cuántico como la absorción de un fotón incidente por el medio para crear un fotón de menor energía que la que presenta el fotón incidente y un fonón, o transición molecular entre dos estados vibracionales, con la energía y el momento adecuados para que conserve la energía y el momento. Es exactamente la energía del fonón involucrado en el proceso, y por ello de la diferencia de frecuencias entre el fotón incidente y el generado los que diferencian a los dos procesos que acabamos de mencionar. En el caso del Scattering Raman se encuentra involucrado un fonón óptico (frecuencia del orden de ≈ 10 THz), mientras que en el Scattering Brillouin se encuentra involucrado un fonón acústico (frecuencia del orden de ≈ 10 GHz) [7].

Debido a que la frecuencia de la onda es proporcional a su energía (ley de Planck), el fotón generado mediante el proceso de Scattering posee menor frecuencia que el original. A esta nueva onda generada se le denomina onda Stokes.

En determinadas circunstancias, la onda Stokes puede propagarse a lo largo de grandes distancias, interaccionando de forma efectiva con la onda de bombeo, y por ello aumentando el valor de su potencia. Para una determinada longitud de fibra, conforme se aumenta la potencia de bombeo, se produce un aumento gradual de la potencia de la onda Stokes a través de Scattering espontáneo. Esto ocurre hasta que la potencia de bombeo alcanza un determinado umbral, a partir del cual, la potencia de la onda Stokes aumenta de forma exponencial con el incremento lineal de la potencia de la onda de bombeo. Es exactamente cuándo se supera el valor de la potencia umbral, punto a partir del cual se genera Scattering estimulado, dando por ello lugar a Scattering Raman estimulado (SRS- Stimulated Raman Scattering) y SBS.

3.4 EFECTO KERR

El efecto kerr es el cambio de índice de refracción de un material bajo la influencia de un campo eléctrico, y consiste en la dependencia de refracción del medio con intensidad de la señal. La fase depende de la intensidad del campo

óptico y provoca distorsión por la modulación cruzada, y auto-modulación fase, la mezcla cuatro ondas y la formación de solitones. Dicho efecto puede ser expresado mediante la siguiente ecuación:

$$n(I) = n_0 + n_2 I \quad 5$$

Donde:

n_0 = Índice de refracción lineal de la fibra

n_2 = Coeficiente lineal

I = Intensidad de la señal

3.5 CHIRP

Un sistema de frecuencia modulada pulsada o chirping es un sistema de espectro ensanchado en el que la portadora de radiofrecuencia se modula con un periodo fijo y una secuencia de trabajo fijo. En otras palabras, son los cambios rápidos de niveles de potencia que ocurren para velocidades de transmisión aproximadamente de 10GHz pueden alterar ligeramente las características del láser causando un cambio de frecuencia en la salida. El chirp de frecuencia puede limitar el desempeño de sistema que operan en 1550nm. Al principio de cada pulso transmitido la frecuencia de portadora se modula en frecuencia causando un ensanchado adicional.

El chirp aparece como una pequeña cantidad de ruido y como variaciones en la longitud de onda dependiendo de la construcción del láser. El chirp puede ampliar el ancho espectral de un láser, que resultaría en dispersión cromática. Este problema se puede superar usando fibras de dispersión desplazada o empleando esquemas que compensan la dispersión. Este chirp de frecuencia puede ser eliminado mediante el uso de moduladores externos, ya que una fuente de luz se encuentra en funcionamiento todo el tiempo [8].

3.6 MODULACIÓN DE FASE INDUCIDA (SELF-PHASE MODULATION)

Cuando el nivel de salida acoplado de una fuente de luz es demasiado alto la señal puede modular su propia fase. Es decir, convierte las fluctuaciones de potencia óptica de una determinada onda en fluctuaciones de fase de la misma onda.

Los fenómenos de SPM en fibras estándar se producen debido a la existencia de un componente del índice de refracción dependiente de la intensidad de las señales ópticas (efecto Kerr). Esto causa un ensanchamiento o compresión del pulso transmitido dependiendo del signo (ya sea positivo o negativo) de la dispersión cromática. Esto causa una asimetría en los extremos de la banda de la señal de salida, a longitudes de onda mayores en el inicio del borde de la señal, y a longitudes de onda más cortas en el borde final del pulso.

La auto-modulación de fase aumenta con la potencia transmitida. Es más destructiva para tasas de bit altas y los tiempos de subida del pulso son más cortos. Generalmente este efecto es más significativo en sistemas con alta dispersión acumulativa o sobre sistemas con longitudes de onda muy grandes. En sistemas WDM con canales muy juntos, el ensanchamiento espectral puede crear interferencia entre canales.

Debido a que el índice de refracción de la fibra tiene un componente que depende de la intensidad de la señal y este índice de refracción no lineal estimula a un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso. Por tal motivo es por la cual las diferentes partes se ven sometido a diferentes cambios de fase y esto da lugar a que se produzca un “chirp” en el pulso, lo que también modificara los efectos de la dispersión cromática. Este efecto es proporcional a la intensidad de la señal de transmisión; es por esto es que los efectos SPM son más pronunciados en los sistemas que utilizan altas potencias de transmisión.

3.7 MODULACIÓN DE FASE CRUZADA (CROSS-PHASE MODULATION)

Se genera cuando dos o más canales ópticos son transmitidos simultáneamente a través de la fibra óptica, usando la técnica WDM, esto es debido a que el índice de refracción efectivo para una onda incidente no solo depende de la intensidad de su onda, sino también de la intensidad de cualquier otra onda que se propague a través del canal, debido a la interacción entre ellas.

En sistemas que emplean modulación PSK la información se imprime digitalmente sobre la fase de la portadora óptica (típicamente desplazamiento de $+\pi/2$ y $-\pi/2$ para representar los símbolos lógicos “0” y “1”). Cualquier fuente de ruido de fase conducirá a una degradación en el funcionamiento de dichos sistemas. Precisamente una no linealidad óptica que afecta solamente a la fase de la señal que se propaga por la fibra es el índice de refracción no lineal, el cual da lugar a una modulación de fase inducida por la portadora.

En sistemas WDM, por otro lado, la modulación de fase cruzada XPM, convierte las fluctuaciones de potencia óptica de un determinado canal en fluctuaciones de fase en el resto de los canales. Por idénticos que sean los parámetros de

sistema, el fenómeno no lineal de XPM es el doble de eficiente que el SPM. Los fenómenos de SPM y XPM en fibras estándar se producen debido a la existencia de un componente del índice de refracción dependiente de la intensidad de las señales ópticas (efecto Kerr). En el caso del silicio se tiene un valor para este coeficiente de refracción no lineal de $3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$. A pesar de su valor reducido, las longitudes con magnitudes elevadas de interacción típicas de los enlaces ópticos magnifican estos efectos no lineales [9].

Las fluctuaciones de potencia en los láseres de InGaAsP son bastante pequeños y aumentan de forma aproximada con la raíz cuadrada de la potencia, inferiores a 1mW. Estos valores conducen a un ruido de fase inferior a 0.04 radianes, el cual es considerablemente pequeño en sistemas con modulación de fase (0.15 radianes de ruido de fase corresponden a una atenuación de potencia de aproximadamente 0.5dB). En sistema WDM, además del SPM se tiene XPM por fluctuaciones de potencia en otros canales del espectro.

Aunque solo se ha considerado el caso de modulaciones de fase para estimar la degradación que producen los fenómenos no lineales de SPM y XPM, debemos tener en cuenta que estos efectos también son significativos en sistemas con modulación de intensidad y detección directa. La causante de ello es la propia dispersión cromática de la fibra, la cual provoca conversión de fase-intensidad con la consiguiente degradación a la salida de dispersión desplazada, si bien debemos tener en cuenta que estas fibras son más no lineales que las fibras estándares.

3.8 MEZCLA DE CUATRO ONDAS (FOUR WAVE MIXING)

La misma no linealidad que da lugar al índice de refracción no lineal participa también en el proceso de mezcla de cuatro ondas en fibras ópticas monomodo. Este proceso no lineal se caracteriza por mezclas de tercer orden entre portadoras ópticas que dan lugar a la aparición de nuevas frecuencias a la salida del medio de transmisión. Considerando que se propagan dos portadoras a frecuencia ópticas f_1 y f_2 por una misma fibra, el proceso no lineal generara dos nuevas bandas laterales a frecuencias $2f_1-f_2$ y $2f_2-f_1$. Estas bandas laterales se propagarán junto con las dos ondas iniciales aumentando su amplitud a expensas de la energía de las originales. De forma similar, tres canales propagándose por la fibra darán lugar a la generación de nuevas ondas adicionales a frecuencias $f_{ijk}=f_i + f_j - f_k$, donde i, j y k pueden ser 1, 2 o 3. Estos nuevos productos generados por FWM se muestran en la figura 10. Si los canales se encuentran igualmente espaciados, algunas de las nuevas ondas generadas tendrán frecuencias coincidentes con las de los canales inyectados en la fibra. De la Figura 9 se desprende que las nuevas ondas generadas por FWM degradaran considerablemente las presentaciones en sistemas WDM con gran número de canales. Los efectos inmediatos serán una atenuación adicional de la potencia de los canales y fenómenos de diafonía.

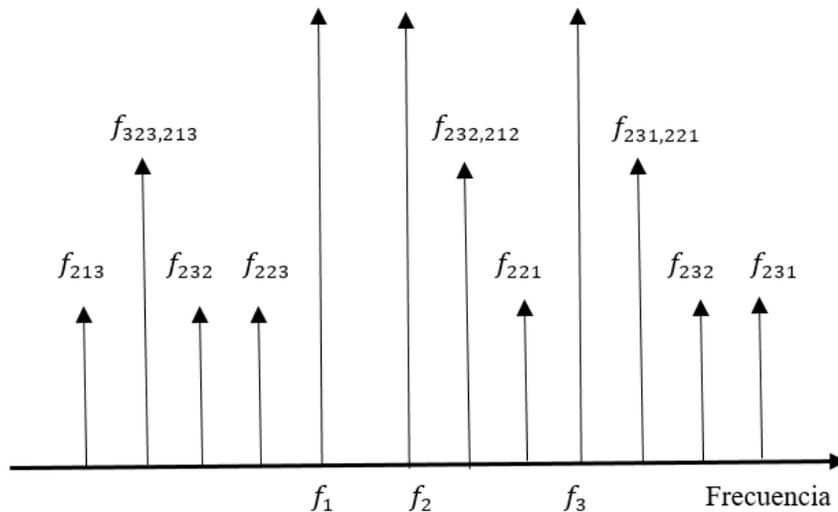


Figura 9 Producto de FWM generados por tres portadoras ópticas

El FWM puede ocurrir cuando se propagan tres señales de frecuencia muy parecidas (constantes de propagación y velocidad similares) generando nuevas frecuencias (fenómeno similar a la distorsión por intermodulación de los sistemas dieléctricos). El mezclado de dos canales (ω_i, ω_j) modula un tercer canal (ω_k) con la frecuencia diferencia generando un nuevo tono lateral, $\omega_k + \omega_i - \omega_j$. El problema del FWM es muy severo en sistemas WDM que utilizan fibras de dispersión desplazada (DSF) ya que la ausencia de dispersión provoca que las ondas de frecuencia diferente se propaguen con una velocidad de grupo similar. Y aún más en sistemas DWDM.

La eficiencia del proceso no lineal de FWM depende del espaciado de los canales y de la dispersión de la fibra. Las velocidades de grupo de las ondas iniciales y generadas son distintas como consecuencia de la dispersión cromática. Esto provoca la destrucción de la condición de adaptación de fases del proceso de FWM y reduce la eficiencia de potencia en la generación de nuevas ondas. La eficiencia del FWM decrece cuando aumenta la diferencia entre velocidades de grupo, por lo que valores de dispersión o separaciones entre canales mayores conducen a menores eficiencias.

3.9 ESPARCIMIENTO ESTIMULADO DE RAMAN

Esto se refiere a la interacción que sufren las señales ópticas con las vibraciones mecánicas moleculares del material de la fibra. Esta interacción se da con un fotón que incide sobre una molécula y le entrega parte de su energía a la vibración mecánica de la molécula. La porción de energía que queda de la señal es irradiada con una longitud de onda

más larga que con la que originalmente se produjo en el transmisor, esto es debido a la energía que se perdió. Esto causa una reducción en su frecuencia óptica y por lo tanto un aumento en el ancho de banda. Este desplazamiento de frecuencia coincide precisamente con la frecuencia de vibración de las moléculas (frecuencia de "Stokes"). Esto produce que la potencia de los canales de menor longitud de onda ("frecuencias altas") se reduzcan y que esta potencia de los canales sea de longitud de onda más larga ("frecuencias bajas"). [9]

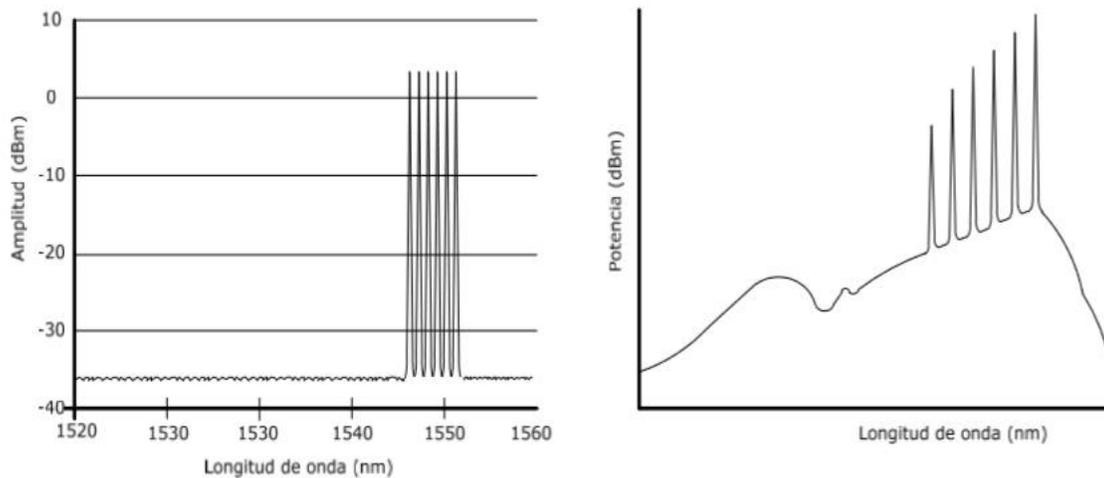


Figura 10 Transferencia de Potencia de la Señal en Longitud de Onda Menores a las Mayores

A esta transferencia de potencia se le conoce como bombeo. La eficiencia del proceso no lineal es directamente proporcional a la potencia de bombeo, la longitud efectiva de la fibra y un coeficiente de ganancia que depende del material, e inversamente proporcional al área efectiva de la fibra.

El proceso puede ser estimulado por un segundo fotón que aparece en esta longitud de onda más larga, de modo que el fotón incidente surge como dos de ellos. A este proceso se le llama amplificación estimulada de Raman.

El efecto SRS provoca el acoplo de canales diferentes en sistemas WDM, separados en frecuencia menor de 15 THz que se acoplaran entre sí por medio del SRS y que da lugar a la diafonía (crosstalk). Por unos cuantos canales, el límite de potencia decrece como $1/N$ (donde N = número de canales) debido a que el espectro Raman es bastante ancho y las potencias de todos los canales contribuyen al proceso de SRS. Conforme se añaden más canales, el ancho de banda óptico ocupado aumenta y las interacciones entre canales resultan más significativas, decreciendo el límite de potencia óptico como $1/2N$, (donde N = número de canales)

3.10 ESPARCIMIENTO ESTIMULADO DE BRILLOUIN

El SBS se produce para niveles de potencia aproximadamente dos órdenes de magnitud inferiores que el fenómeno del SRS. El proceso se manifiesta como la generación de una onda acústica a partir del proceso físico de la electrostricción. Esta onda acústica realiza una modulación del índice de refracción del medio, produciendo un efecto similar al de una red de difracción que se propaga con la onda de bombeo que la genera, y que produce una cierta dispersión sobre ésta. La luz dispersada se transfiere a una frecuencia menor (onda Stokes), a causa del efecto Doppler asociado al movimiento de la red de difracción a la velocidad acústica propia del medio v_A . La onda Stokes generada se transmite en dirección contra-propagante a la dirección en que se propaga la onda de bombeo que la genera, portando la mayor parte de la potencia de dicha onda de bombeo una vez alcanzado el umbral necesario para la generación de SBS. Este proceso lo hemos representado de forma gráfica en la Figura 12, en la que se han representado la onda de bombeo, las ondas acústicas que genera la onda de bombeo, y la onda Stokes que se propaga en sentido contrario a la dirección de propagación de la onda de bombeo [10].

El motivo por el cual, el fenómeno SBS limita la potencia de canal en los sistemas de comunicaciones por fibra óptica, es justamente por el hecho de que este fenómeno produce una banda de amplificación a otra frecuencia.

Este efecto en los sistemas de comunicación, se puede aprovechar para la realización de láseres de muy poca anchura espectral, amplificadores Brillouin en fibra de banda estrecha, filtros ópticos de banda estrecha y sensores distribuidos.

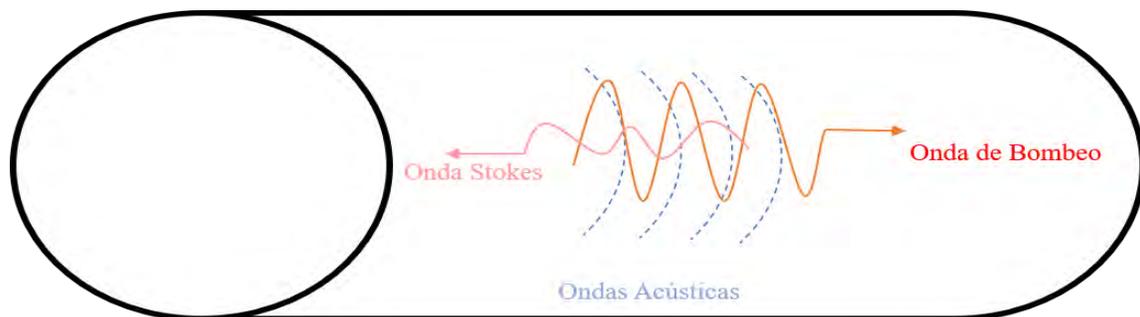


Figura 1 Representación esquematizada del proceso SBS en la fibra óptica

3.11 DIFERENCIA ENTRE ESTIMULADO DE RAMAN Y ESTIMULADO DE BRILLOUIN

La diferencia entre los niveles de potencia umbral para cada uno de los procesos no paramétricos da lugar a la existencia de una serie de diferencias importantes entre ambos, y que son debidas principalmente a la diferente naturaleza de los fonones generados.

Podemos resumir estas diferencias de la siguiente manera:

1. El umbral de potencia para la misma fibra a partir del cual se produce el efecto Raman es dos órdenes de magnitud mayor que para el efecto Brillouin. Este hecho surge como consecuencia de la mayor eficiencia del efecto Brillouin.
2. La onda Stokes para el efecto Brillouin sólo se propaga en sentido contrapropagante al sentido de la onda de bombeo. Sin embargo, en el efecto Raman la amplificación puede producirse en ambos sentidos, pero el proceso es más eficiente en el sentido co-propagante, ya que el umbral para este sentido es un 20% menor que para el sentido contra-propagante.
3. El efecto Brillouin está condicionado por las características de coherencia de la fuente de bombeo, es decir, de la anchura espectral de línea, mientras que el efecto Raman es razonablemente independiente del ancho espectral de la fuente utilizada, siempre que éste no sea inferior a un valor de $\approx 0.5\text{nm}$.
4. Mientras que en el efecto Raman los fotones generados presentan un desplazamiento de frecuencia respecto de la onda de bombeo de 13.2THz , los fotones generados en el efecto Brillouin lo hacen a una frecuencia comprendida entre 10 y 13GHz dependiendo de la fibra en cuestión y de la longitud de onda de la señal de bombeo. Además, el espectro de ganancia del efecto Raman tiene una extensión de varios Tera Hertzios mientras que el espectro de ganancia típico del efecto Brillouin está comprendido entre los 10 y los 50MHz .

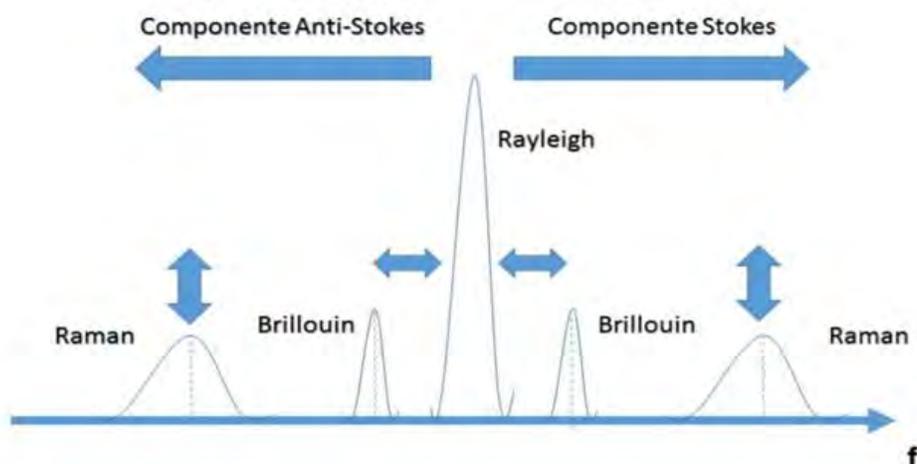


Figura 11 Frecuencias de Rayleigh, Raman, Brillouin

3.12 EFECTOS NO LINEALES Y SU RELACIÓN CON LOS PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN

Tabla 3 Diferencia entre los diferentes fenómenos

Efecto no lineal	Causa	Dependencia	Impacto
SPM	Efecto Kerr: Índice de refracción dependiente de la intensidad.	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud de onda de la señal. • Velocidad de transmisión. • Tipo de fibra (área efectiva, dispersión, coeficiente de índice no lineal). 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensanchamiento del pulso • Dispersión de amplitud • Interferencia entre símbolos
XPM	Efecto Kerr: Índice de refracción dependiente de la intensidad.	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia del canal • Esparcimiento entre canales • Tipo de fibra (área efectiva, dispersión, coeficiente de índice no lineal). 	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio de amplitud • Interferencia (ISI).
FWM	Interacción múltiple de fotones.	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia de la señal. • Número de canales. • Tipo de fibra (área efectiva, dispersión, coeficiente de índice no lineal). 	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de componentes FWM que interfieren con la señal original y otras señales WDM. • Atenuación en la potencia de los canales existentes.
SRS	Interacción fotón-fonones ópticos.	<ul style="list-style-type: none"> • Intensidad del pulso incidente. • Tipo de fibra (área efectiva, longitud efectiva). 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida óptica en la fibra. • Pérdida en la potencia de la señal. • Crosstalk óptico en sistemas WDM.
SBS	Interacción fotón-fonones acústicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud de onda. • Tipo de fibra (tamaño del núcleo). • Potencia de la señal. • Separación entre canales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limita la cantidad de luz que puede transmitirse a través de un trayecto de fibra. • Inestabilidad en la señal. • Diafonía.

CAPITULO 4: EL ESPARCIMIENTO BRILLOUIN ESTIMULADO EN LA FIBRA ÓPTICA

4.1 CONCEPTOS BÁSICOS

El fenómeno no lineal de esparcimiento Brillouin estimulado, se observó en el año 1964, y ha sido estudiado extensivamente. Es similar a SRS en la medida en que se manifiesta a través de la generación de una onda Stokes cuya frecuencia se desplaza hacia abajo desde la de la luz incidente en una cantidad establecida por el medio no lineal. Pero, una gran diferencia existe entre SBS y SRS; es por ejemplo, la propagación de la onda de Stokes retrocede cuando se produce SBS en una fibra óptica monomodo, en contraste con SRS que puede ocurrir en ambas direcciones. La potencia de la bomba de umbral para SBS depende del ancho espectral asociado con la onda de bombeo. Se dice que un proceso de dispersión de luz es espontáneo si las fluctuaciones (por lo general en la constante dieléctrica) que causan la dispersión de la luz son excitadas por efectos térmicos o de punto cero mecánicos cuánticos.

4.2 TEORÍA BÁSICA

El esparcimiento de Brillouin es un proceso no lineal que puede ocurrir en fibras ópticas a gran intensidad. La gran intensidad produce compresión (debido al campo eléctrico también conocido como campo de bombeo) en el núcleo de la fibra a través del proceso conocido como electrostricción. Este fenómeno produce fluctuaciones de densidad en el medio de la fibra. Aumenta el desorden material, que a su vez modula el índice de refracción lineal del medio y da como resultado una no linealidad electrostrictiva. El índice de refracción modulado se comporta como una rejilla de índice, que es inducida por bomba. La dispersión de la luz de la bomba a través de la desviación por la rejilla de Bragg de índice inducida por la bomba se denomina esparcimiento de Brillouin. El fenómeno depende del tiempo, por lo que la luz dispersa se desplaza (desplazamiento de Brillouin) en frecuencia según la frecuencia de la onda de sonido. Para pulsos más cortos que 500ps, no hay superposición espacial entre el pulso y la onda acústica, lo que da como resultado una no linealidad electrostrictiva despreciable. [11]

Desde un punto de vista cuántico, el efecto Brillouin puede verse de una forma similar al efecto Raman. Un fotón de cierta energía (frecuencia) es aniquilado al interactuar con la molécula de sílice de la fibra para generar un fotón de energía menor y un fonón acústico con la energía y momento adecuados. En la Figura 13 hemos ilustrado este proceso: la onda de mayor energía (onda de bombeo), que hemos representado en la figura en color rojo, interactúa con la molécula de sílice, y le transfiere a ésta parte de su energía haciendo pasar a dicha molécula a otro modo vibracional de mayor energía, mientras que otra onda presente en el proceso, es contrapropagante a la onda de bombeo, presenta una frecuencia inferior a la primera (la hemos representado en la figura de color rosa), siendo amplificada por la onda de bombeo.

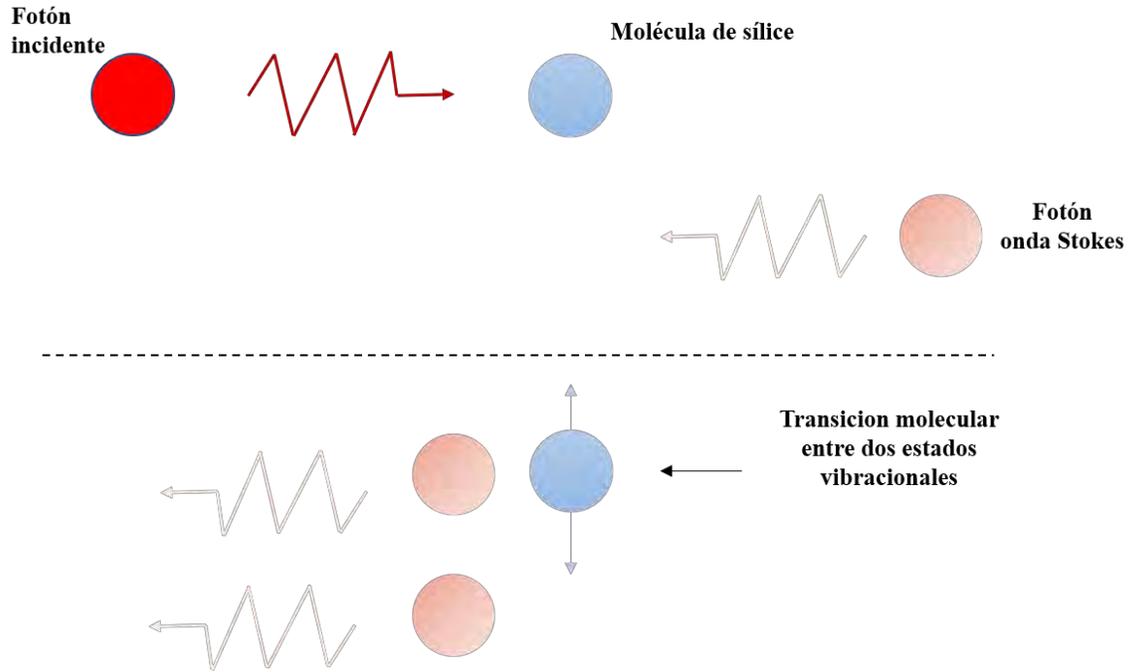


Figura 12 Representación Esquemática del Proceso SBS

4.3 ELECTROSTRICCIÓN

La electrostricción es la tendencia de los materiales a comprimirse en presencia de un campo eléctrico. La electrostricción es de interés tanto como un mecanismo que conduce a una respuesta óptica no lineal de tercer orden y como un mecanismo de acoplamiento que conduce al esparramamiento estimulada de Brillouin.

El origen del efecto se puede explicar en términos del comportamiento de una losa dieléctrica colocada en el campo de franja de un condensador plano-paralelo. La losa experimentará una fuerza que tiende a tirar en la región de máxima intensidad de campo. La naturaleza de esta fuerza se puede entender global o localmente. Podemos entender el origen de la fuerza electrostrictiva desde una perspectiva global punto de vista como una consecuencia de la maximización de la energía almacenada. [12]

El proceso físico de la electrostricción es el responsable de que se produzcan la difusión Brillouin. Este fenómeno (ver Figura13), se produce por la tendencia de los materiales dieléctrico a comprimirse en presencia de un campo eléctrico interno que se denomina presión electrostrictiva y que se relaciona con el campo eléctrico que lo genera a través de la ecuación (6).

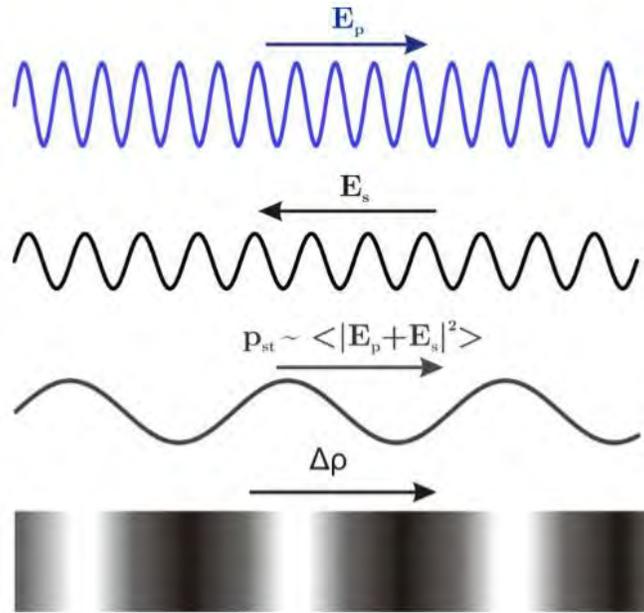


Figura 13 Representación Esquemática del Proceso de Electrostricción en Fibras Ópticas. La Presencia de Forma Conjunta de una Onda de Bombeo (E_p) y una Onda Stokes (E_s) Producen una Variación de Presión Electrostrictiva p_{st} que se Traduce en una Onda Sonora Caracterizada por una Variación Local de Densidad $\Delta\rho$ y por ello también de su Índice de Refracción Efectivo n_{eff}

$$p_{st} = -\frac{1}{2}c_e \langle |\vec{E}|^2 \rangle \quad 6$$

Donde c_e es la constante electrostrictiva del material, que de acuerdo con la ley de Lorentz-Lorenz, se puede calcular como:

$$c_e = \frac{(n^2 - 1)(n^2 + 2)}{3} \quad 7$$

Las variaciones de presión ocasionadas en las fibras provocan que se produzcan unas variaciones de la densidad del medio, $\Delta\rho$, y como consecuencia se producen unas variaciones de la constante dieléctrico de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\Delta\varepsilon = \frac{C_e}{\rho_0} \Delta\rho \quad 8$$

Siendo ρ_0 la densidad del material en ausencia de electrostricción. Como consecuencias de este proceso, las variaciones de densidad en el medio $\Delta\rho$ se traducen en la aparición de una onda acústica, y por ello se encuentran gobernadas por las leyes propias de la acústica.

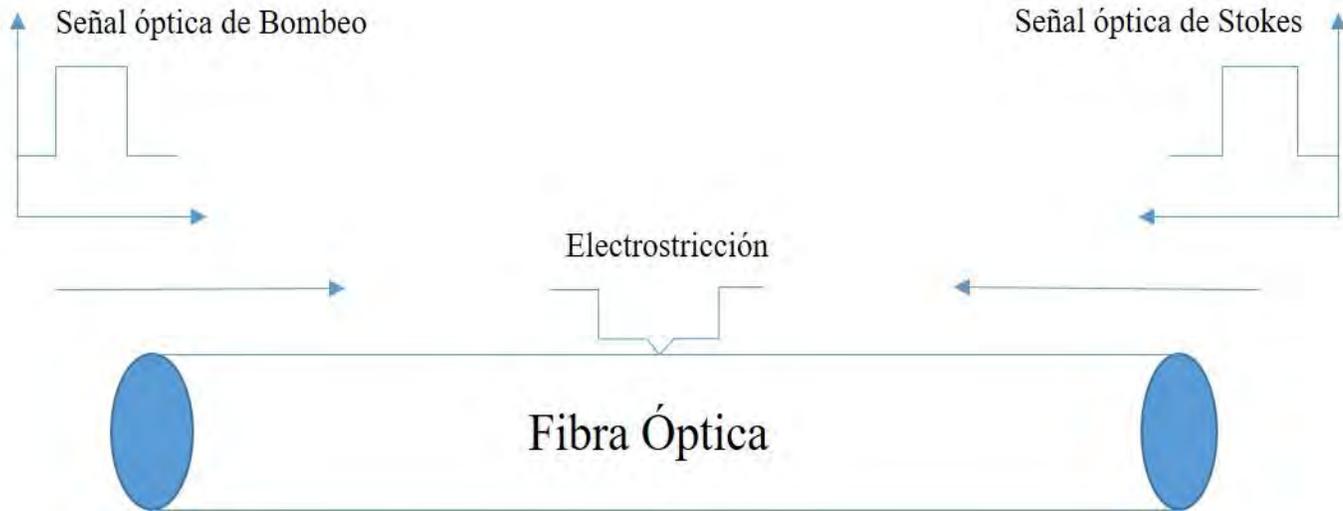


Figura 14 Explicación del Fenómeno de Electrostricción

4.4 PROCESO FÍSICO

El proceso de SBS se puede describir como una interacción entre la onda de bombeo y el campo Stokes a través de una onda acústica. El campo de bombeo genera una onda acústica a través del proceso de Electrostricción. La onda acústica sucesivamente modula el índice de refracción del medio. Esta rejilla de índice inducido por el bombeo esparce la luz de bombeo a través de la difracción Bragg. La luz esparcida es desviada en frecuencia debido a la desviación Doppler asociado con un movimiento de la rejilla a la velocidad acústica v_A . El mismo proceso de esparcimiento se puede visualizar desde el punto de vista de la mecánica cuántica como si un fotón de bombeo crea un fotón de Stokes y un fonón acústico simultáneamente. Como la energía y el momento se debe conservar durante cada evento de esparcimiento, las frecuencias y los vectores de onda de las tres ondas se relación por la siguiente ecuación:

$$\Omega_B = \omega_p - \omega_s, \quad k_A = k_p - k_s \quad 9$$

Donde ω_p y ω_s son las frecuencias, y k_p y k_s son los vectores de onda, del bombeo y Stokes, respectivamente. La frecuencia Ω_s y el vector k_A de la onda acústica satisfacen la relación de dispersión estándar

$$\Omega_B = v_A |k_A| \approx 2v_A |k_p| \sin \frac{\theta}{2}, \quad 10$$

Donde θ es el ángulo entre los campos de bombeo y Stokes, y usamos $|k_p| \approx |k_s|$ en la ecuación (10). La ecuación (11) muestra que la desviación de frecuencia de la onda Stokes depende del ángulo de esparcimiento. En particular, Ω_B es máximo en la dirección inversa ($\theta=\pi$) y no existe en la dirección hacia adelante ($\theta=0$). En una fibra óptica monomodo, las direcciones relevantes son solamente hacia adelante y hacia atrás (inversa). Por esta razón, SBS ocurre solamente en la dirección inversa con la desviación en frecuencia Brillouin dado por

$$\nu_B = \frac{\Omega_B}{2\pi} = \frac{2n\nu_A}{\lambda_p}, \quad 11$$

Donde en la ecuación (11) se usó $|k_p| = \frac{2\pi n}{\lambda_p}$ y n es el índice de refracción modal a la longitud de la onda de bombeo λ_p . Si usamos $\nu_A = 5.96$ km/s y $n=1.45$, los valores apropiados para la fibra de sílice, $\nu_B \approx 11.1$ GHz a $\lambda_p = 1.55\mu m$. Aunque lo anterior predice correctamente que el SBS debería ocurrir solo en la dirección inversa en fibra monomodo, también puede ocurrir en la dirección hacia adelante. Esto sucede debido a que la naturaleza de la onda acústica nos lleva a una relajación de la regla de selección del vector de onda. Como resultado, una pequeña cantidad de luz de Stokes se genera en la dirección hacia adelante. Este fenómeno se conoce como esparcimiento Brillouin de onda acústica guiada. En la práctica, el espectro Stokes muestra múltiples líneas con desviaciones de frecuencia en el rango de 10-1000 MHz. Pero debido a su carácter extremadamente débil, este fenómeno no se considera en nuestro estudio.

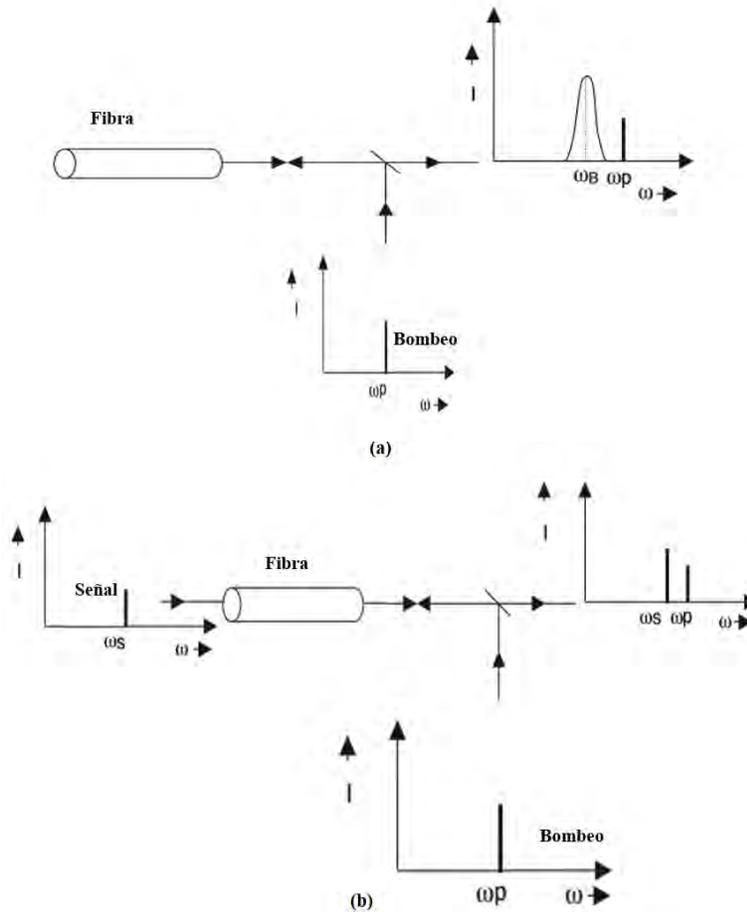


Figura 15 (a) Fenómeno del Esparcimiento Espontaneo de Brillouin (b) Fenómeno del Esparcimiento estimulado de Brillouin

4.5 ESPECTRO DE GANANCIA BRILLOUIN

El crecimiento de la onda de Stokes se caracteriza por el espectro de ganancia Brillouin $g_B(\Omega)$ con el pico en $\Omega = \Omega_B$. En comparación con el caso de SRS, el ancho espectral del espectro de ganancia es muy pequeño (~ 10 MHz en lugar de 10 THz) debido a que está relacionado al tiempo de amortiguación (Damping time) de la onda acústica o el tiempo de vida del fonón. De hecho, si se asume que la onda acústica decae como $\exp(-\Gamma_B t)$, la ganancia Brillouin tiene un espectro Lorentziano de la forma

$$g_B(\Omega) = g_p \frac{(T_B/2)^2}{(\Omega - \Omega_B)^2 + (T_B/2)^2}, \quad 12$$

Donde el valor pico de la ganancia Brillouin ocurre en $\Omega = \Omega_B$ y es dado por la siguiente expresión:

$$g_p = g_B(\Omega_B) = \frac{2\pi^2 n^7 p_{12}^2}{c \lambda_p^2 P_0 v_A T_B},$$

Donde p_{12} es el coeficiente elasto-óptico longitudinal y ρ_0 es la densidad del material. El ancho máximo a un medio del máximo (FWHM) del espectro de ganancia se relaciona a la Γ_B como $\Delta\nu_B = \frac{\Gamma_B}{2\pi}$. El tiempo de vida del fonón se relaciona con Γ_B como $T_B = \Gamma_B^{-1} \sim 10$ ns.

La ecuación (12) para la ganancia Brillouin se obtiene bajo condición de estado estable y es valido para un bombeo en CW o casi-CW ($T_0 \gg T_B$), cuyo ancho espectral $\Delta\nu_p$ es mucho más pequeña que $\Delta\nu_B$. Para pulsos de bombeo de ancho $T_0 < T_B$, la ganancia Brillouin se reduce substancialmente comparado con el obtenido en la ecuación (13). En efecto, si el ancho del pulso llega a ser mucho mas pequeño que el tiempo de vida del fonon ($T_0 < 1$ ns), la ganancia Brillouin se reduce debajo de la ganancia Raman, entonces un pulso de bombeo genera un pulso Raman de propagación hacia adelante.

Incluso para una onda de bombeo CW, la ganancia Brillouin se reduce considerablemente si el ancho espectral $\Delta\nu_p$ del bombeo excede $\Delta\nu_B$.

En el caso de un láser de bombeo con un perfil espectral lorentziano de ancho $\Delta\nu_p$, el espectro de ganancia es dado por la ecuación (12) pero el valor pico de la ganancia se reduce por un factor $1 + \Delta\nu_p/\Delta\nu_B$, como un resultado, el umbral SBS incrementa por un factor grande cuando $\Delta\nu_p \gg \Delta\nu_B$.

4.6 UMBRAL DE BRILLOUIN

Para propósitos de estimación del umbral de Brillouin, el desvanecimiento del bombeo se puede despreciar. Usando $I_p(z) = I_p(0)e^{-\alpha z}$ en la ecuación (12) e integrando sobre la longitud de la fibra L, la intensidad del Stokes se encuentra creciendo exponencialmente en la dirección inversa al bombeo, como:

$$I_s(0) = I_s(L) \exp(g_B P_0 L_{eff} / A_{eff} - \alpha L), \quad 14$$

Donde $P_0 = I_p(0)A_{eff}$ es la potencia de bombeo en la entrada, A_{eff} es el área efectiva y la longitud de interacción se da por

$$L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha \quad 15$$

La ecuación (14) muestra que una señal Stokes incidente en $z=L$ crece en dirección inversa debido a la amplificación Brillouin, el cual ocurre como resultado del SBS. En la práctica, no se alimenta tal señal (al menos que la fibra sea

usada como amplificador Brillouin), por lo que la onda Stokes crece del ruido o esparcimiento Brillouin espontáneo ocurriendo a través de la fibra. De manera similar al caso SRS, este es equivalente a inyectar un fotón ficticio por modo a una distancia donde la ganancia iguala exactamente la pérdida de la fibra. Siguiendo un método similar al caso SRS, el umbral Brillouin ocurre a una potencia P_{cr} obtenido desde:

$$g_B P_{cr} L_{eff} / A_{eff} \approx 21; \quad 16$$

Donde g_B es el valor pico de la ganancia Brillouin dado por la ecuación (12). Si usamos valores típicos para las fibras usadas en los sistemas de comunicaciones ópticos a $1.55\mu\text{m}$, $A_{eff}=50\mu\text{m}^2$, $L_{eff}=20\text{ km}$, $g_B=5 \times 10^{-11}\text{ m/W}$, la ecuación (16) predice que $P_{cr}=1\text{mW}$. Por lo que un umbral de Brillouin bajo hace que el SBS sea un proceso no lineal dominante en las fibras ópticas. El nivel de umbral predicho por la ecuación (16) es solo una aproximación ya que la ganancia Brillouin efectiva se puede reducir por muchos factores en la práctica. Por ejemplo, el umbral SBS incrementa por 50% cuando el estado de polarización del campo de bombeo llega a ser completamente variable. La no homogeneidad de la fibra también afecta la ganancia Brillouin efectiva en las fibras ópticas. Las variaciones en el nivel de dopaje a lo largo de la dirección radial producen cambios ligeros en la velocidad acústica en esta dirección. Como resultado de esto, el umbral SBS depende de los varios dopantes usados para hacer las fibras. Similarmente, las variaciones longitudinales en el corrimiento Brillouin Ω_B a lo largo de la fibra pueden reducir la ganancia Brillouin e incrementar el umbral SBS. Esta característica se puede usar para reducir la ganancia Brillouin efectiva e incrementar el umbral SBS. Esta característica se puede usar para suprimir SBS mediante cambios intencionales del radio del núcleo a lo largo del núcleo de la fibra debido a que Ω_B depende del radio del núcleo [13].

CAPITULO 5: CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DEL EFECTO SBS

5.1 INTRODUCCIÓN

Un sistema de comunicación óptico es muy parecido a los sistemas de comunicaciones que usan otros medios de transmisión distintos a la fibra óptica. La principal diferencia radica en la longitud de onda de la señal utilizada para transmitir información. Entre más elevada sea la frecuencia de una onda electromagnética, mayor será la cantidad de información que esta pueda transmitir. Esta diferencia hace que su comportamiento sea muy diferente, tanto en lo referente a sus propiedades de transmisión a través de cualquier medio como al de los dispositivos capaces de generar y detectar el tipo de radiación empleada. La estructura más sencilla de clasificar estos sistemas consiste en un transmisor, un canal de comunicación y un receptor; sin embargo, existen muchos otros componentes que deben ser considerados para realmente poder hablar de un sistema de comunicaciones ópticas.

5.2 ARREGLO ÓPTICO

Para poder estudiar el fenómeno del Esparcimiento Brillouin Estimulado fue necesario diseñar un arreglo óptico como se muestra en la Figura 17. La configuración experimental consistió básicamente de dos láseres a 980 y 1550 nm, un multiplexor, un amplificador de fibra dopada de Erblio (EDFA), circulador óptico, 25 km de fibra monomodo SMF-28 y de igual forma se utilizó un analizador de Espectro Óptico (OSA).

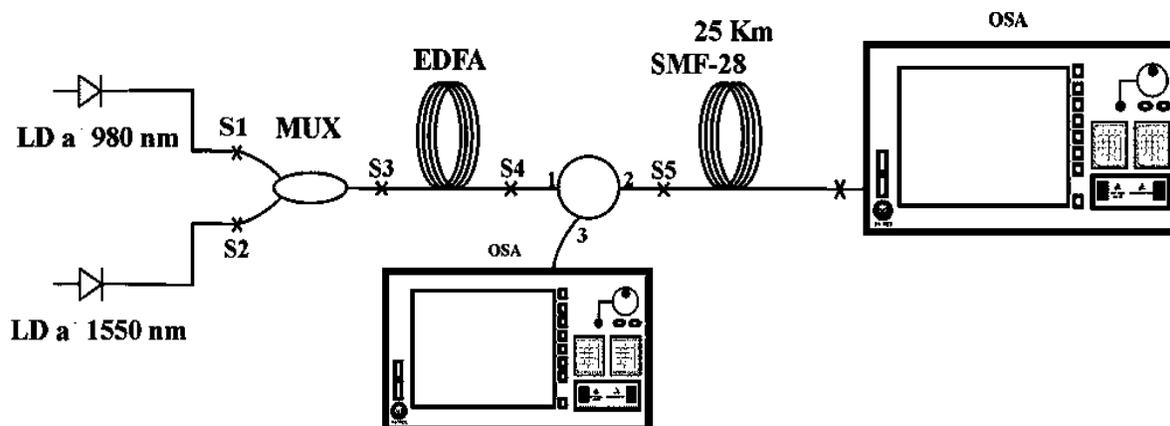


Figura 16 Arreglo Óptico Diseñado para la Caracterización del Esparcimiento Brillouin Estimulado

Tomando en cuenta el diseño del arreglo propuesto en la Figura 16, se implementó con los componentes y equipos ópticos como se muestra en la Figura 17.



Figura 17 Implementación del Arreglo Óptico para la Caracterización del Esparcimiento Brillouin Estimulado

La terminal 3 del circulador se usó para medir la potencia Brillouin y Rayleigh en el origen de la fibra, los cuales como ya habíamos comentado viajan en contrasentido al bombeo (Backward), se consideró una pérdida de inserción de 1.2 dB en el circulador ya que se hizo una caracterización del circulador. La potencia de bombeo residual (Forward) se midió en el extremo de la fibra.

5.3 LÁSERES

Como se mencionó dos láseres fueron utilizados en este experimento para hacer las mediciones; los láseres utilizados fueron uno a 980nm y uno 1550nm. La razón por la cual se usaron dos láseres es porque la señal del láser que está a 1550nm necesitaba un láser de bombeo que en este caso fue un láser de bombeo a 980nm. Esta señal fue unida a través de un WDM o multiplexor para luego ser transmitido la señal a través de un amplificador EDFA.

Los modelos de los láseres utilizados en este experimento son los siguientes:

- 1) ThorLabs ITC 510 Laser Diode Combi Controller (Laser a 950nm), ver Figura 18.
- 2) ThorLabs S3FC Fiber Coupled DFB Laser Source (Laser a 1550nm), ver Figura 19.



Figura 18 Laser ThorLabs ITC 510 Laser Diode Combi Controller (Laser a 950nm)

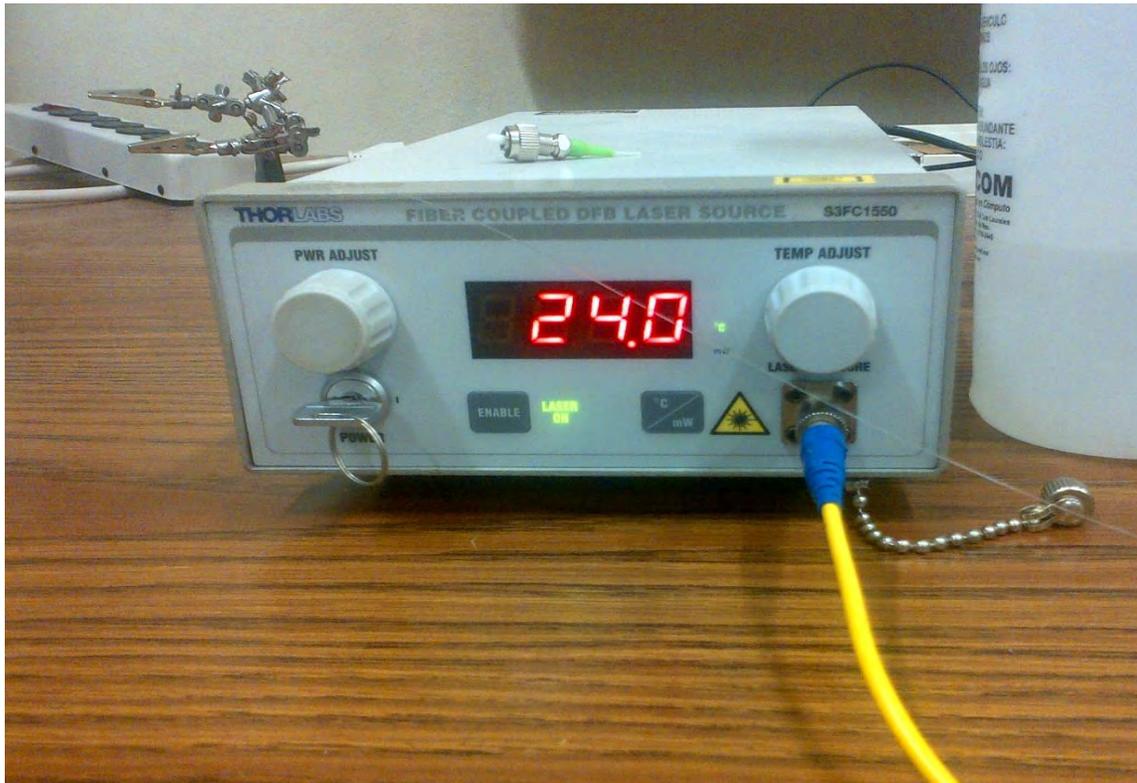


Figura 19 ThorLabs S3FC Fiber Coupled DFB Laser Source (Laser a 1550nm)

5.4 MULTIPLEXOR

En nuestro arreglo empleamos un multiplexor de longitud de onda o Wavelength división Multiplexor (WDM), el cual se usó para obtener la señal de 1550nm del láser y la otra señal de 980nm, correspondiente al bombeo.

WDM consiste en que por una misma fibra se transmitan varias señales y cada una en una longitud de onda diferente y con la misma tasa binaria, esto sin que exista interferencia entre ellas. De este modo la capacidad del enlace se multiplica por el número de canales. Las señales de cada canal se combinan mediante un multiplexor WDM antes de ser introducidas en la fibra óptica. A lo largo del enlace se emplean EDFA para contrarrestar la atenuación.

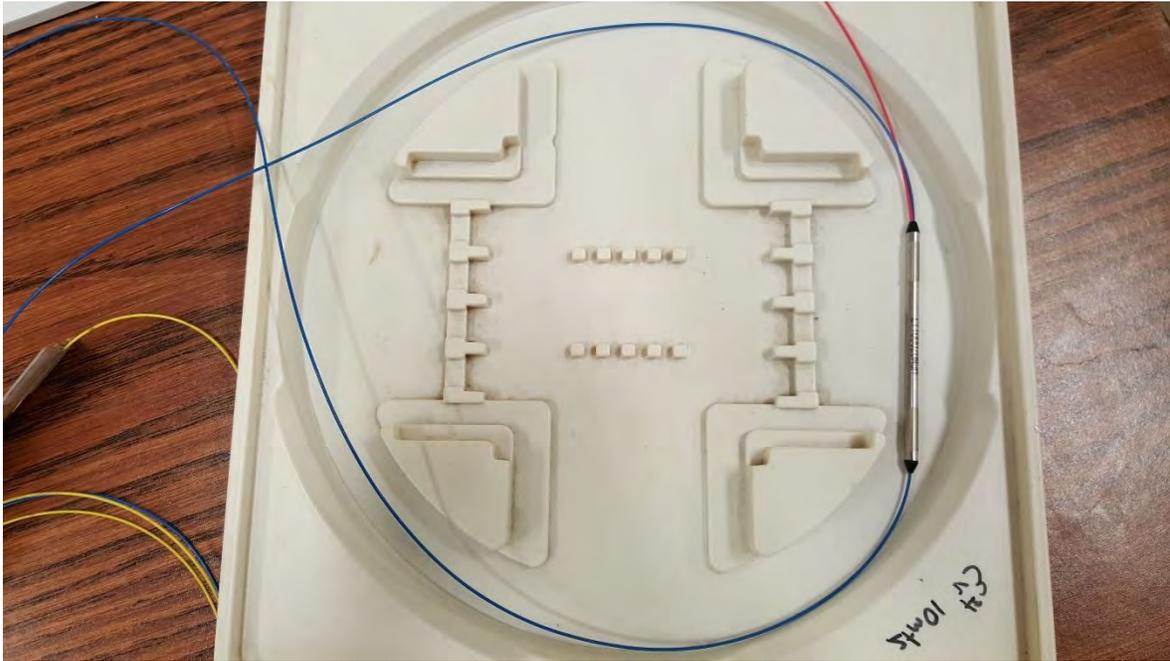


Figura 20 El WDM Utilizado en el Arreglo Óptico para Unir las Dos Señales de los Láseres para Hacer la Conexión con el EDFA

5.5 EDFA

En el arreglo óptico fue empleado un amplificador de fibra dopada con Erblio o Erbium-doped fiber amplifier (EDFA). El uso de este amplificador es debido a que el EDFA es el amplificador de fibra dopada más empleado en la actualidad, ya que es posible amplificar señales en la tercera ventana (1550nm). Al dopar con iones de erbio el núcleo de una fibra óptica se provoca un ensanchamiento de las bandas de transición. Esto a su vez provoca un ensanchamiento considerable del rango de longitudes de onda que pueden ser amplificadas.

En nuestro arreglo el uso de un EDFA fue necesario para amplificar la señal ya que fue transmitida a través de 25km de fibra.

5.6 CIRCULADOR

Un circulador fue necesario utilizar en el arreglo propuesto, debido a que a través del uso del circulador se pudieron obtener las diferentes mediciones. El circulador está conformado de 3 salidas, en nuestro experimento lo nombramos como (1) refiriéndose a la entrada de parte de la potencia de bombeo o Power Pump (P_p), (2) para realizar la medición

de potencia de salida o Power Pump forward (PP_f), y (3) para realizar la medición de potencia de regreso o Power Pump Backward (PP_B).

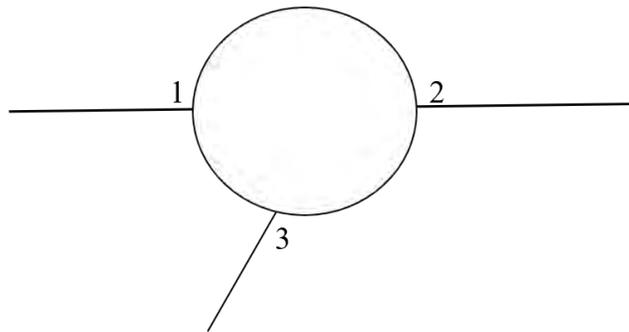


Figura 21 Clasificaciones de Salida del Circulador

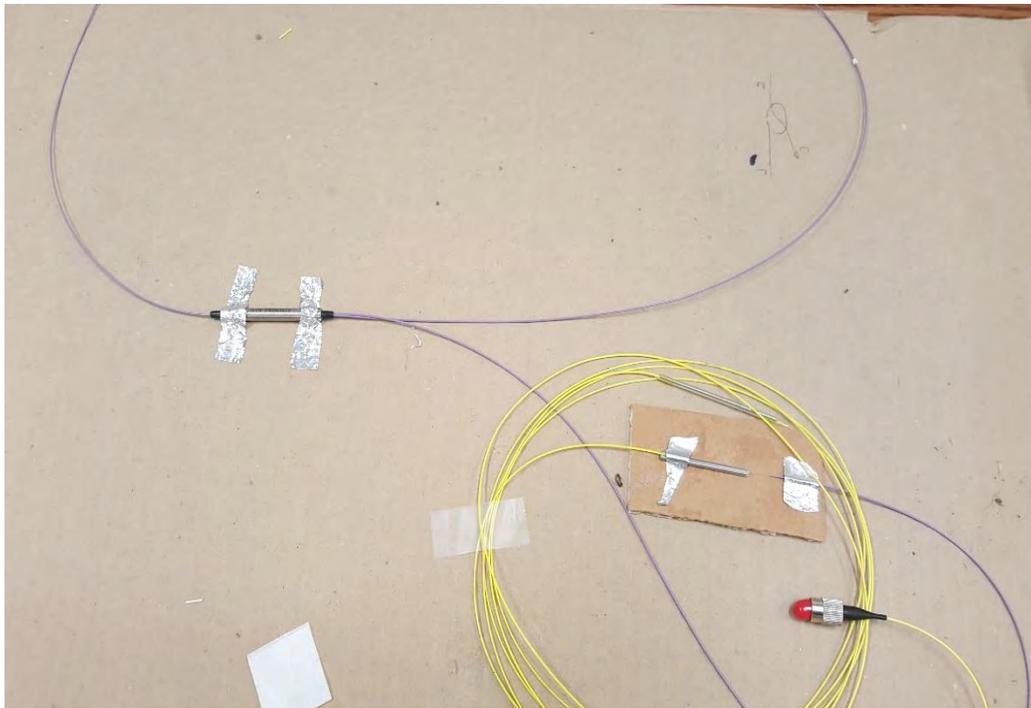


Figura 22 Circulador Utilizado para Tener las Mediciones en la Salida 2 y 3

5.7 FIBRA SMF-28

Una fibra monomodo SMF-28 de 25Km fue empleada en el arreglo propuesto, para poder realizar la caracterización del esparcimiento Brillouin Estimulado, a 25Km de distancia y con este tipo de fibra.

La razón por la cual esta fibra se llama SMF es por las singlas en ingles que significa Single Mode Fiber o en español fibra de un solo modo o monomodo. La fibra SMF-28 cumple con los estándares de valor y rendimiento para ser

usada en telefonía, televisión por cable y aplicaciones para redes. Usado generalmente en la transmisión de voz, datos y/o servicios de video. La fibra SMF-28 es manufacturada para las más demandantes especificaciones en la industria.



Figura 23 25km de Fibra SMF-28 Bare Fiber Spool Utilizado

5.8 ANALIZADOR DE ESPECTRO ÓPTICO

El uso de un analizador de espectro óptico o mejor conocido como Optical Spectrum Analyzer (OSA) fue importante en el arreglo óptico. EL OSA se utiliza para realizar medidas de potencia óptica en función de la longitud de onda. Sus aplicaciones incluyen la caracterización de fuentes de luz (diodos de emisión de luz, LED, y láser, LD) en cuanto a su distribución de potencia y pureza espectral (anchura espectral); así como la medida de la característica en transmisión de componentes ópticos pasivos.

Atraves del OSA se pudieron obtener las medidas que eran necesarias para el análisis del fenómeno de SBS. El OSA fue utilizado en tres puntos, ya que era necesario tomar las mediciones en dichos puntos. Basado en la Figura 16, los puntos fueron el S4, salida de los 25km y la salida 3 del circulador tal como se muestra en la figura 16. En el punto S4 se midió la señal de bombeo o PowerPump (P_p), en la salida de los 25km fue medido la señal PowerPump Forward

(PP_f) y por último en la salida 3 del circulador se obtuvo la señal de Power Backward (PP_B) donde se observó el fenómeno de Brillouin y Rayleigh.



Figura 24 Analizador de espectro Óptico Utilizado para Ver las Mediciones de la Marca YOKOGAWA

CAPITULO 6: RESULTADOS

Como se había mencionado en el capítulo anterior se realizaron mediciones en tres diferentes puntos para tener los datos y la información necesaria para ver el comportamiento de la señal. Los puntos utilizados fueron la terminal 2 del circulador (S5) la cual fue considerada como la potencia de bombeo inicial (P_{po}) de los 25km de fibra. Al extremo de la fibra fue otro punto para tomar mediciones de las potencias de bombeo residual (forward), y por último se tomaron mediciones en la terminal 3 del circulador, para las potencias Brillouin y Rayleigh que son las potencias contrasentido (Backward). En el experimento se fue variando intencionalmente la potencia de bombeo inicial para observar cómo evolucionan las potencias reflejadas (Backward Brillouin y Rayleigh) y la potencia de bombeo residual en extremo de la fibra. En las Figuras 25-29 a_i ($i = 1,2,3,4,5$), se muestra las variaciones en el espectro de potencia del bombeo inicial; en las Figuras 25-29 b_i se muestra las variaciones del espectro de potencia de bombeo residual en el extremo de la fibra (Forward), donde podemos observar los efectos de dispersión y como se alcanza la saturación cuando la potencia es casi constante; en las Figuras 25-29 c_i se muestran las variaciones de los espectros de SBS y Rayleigh (Backward).

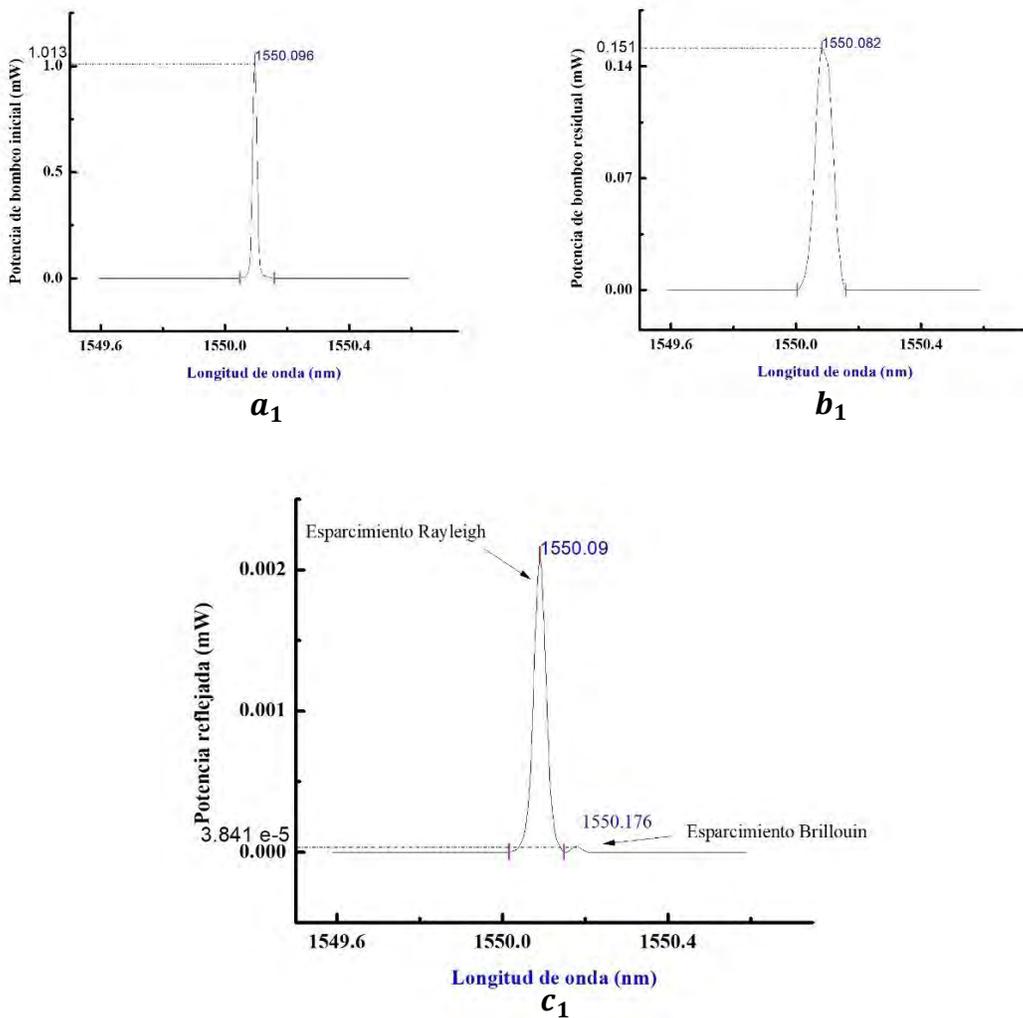


Figura 25. Graficas de pruebas tomada en 3 diferentes puntos donde se observa la potencia de bombeo mínima para obtener el stock Brillouin

En la Figura 25a₁ se observa cual es la potencia de bombeo mínima para que el stock de Brillouin se empiece a generar, mientras en la Figura 25 b₁ se observa que la potencia de bombeo residual varia un poco a la potencia de bombeo. En la Figura 25 c₁ se observa que la potencia Rayleigh sigue siendo mayor y predominante como potencia de reflejo. De igual manera se observa como la potencia de bombeo fue reducienda de 1.013mW a 0.151mW al final de los 25 km de fibra SMF-28.

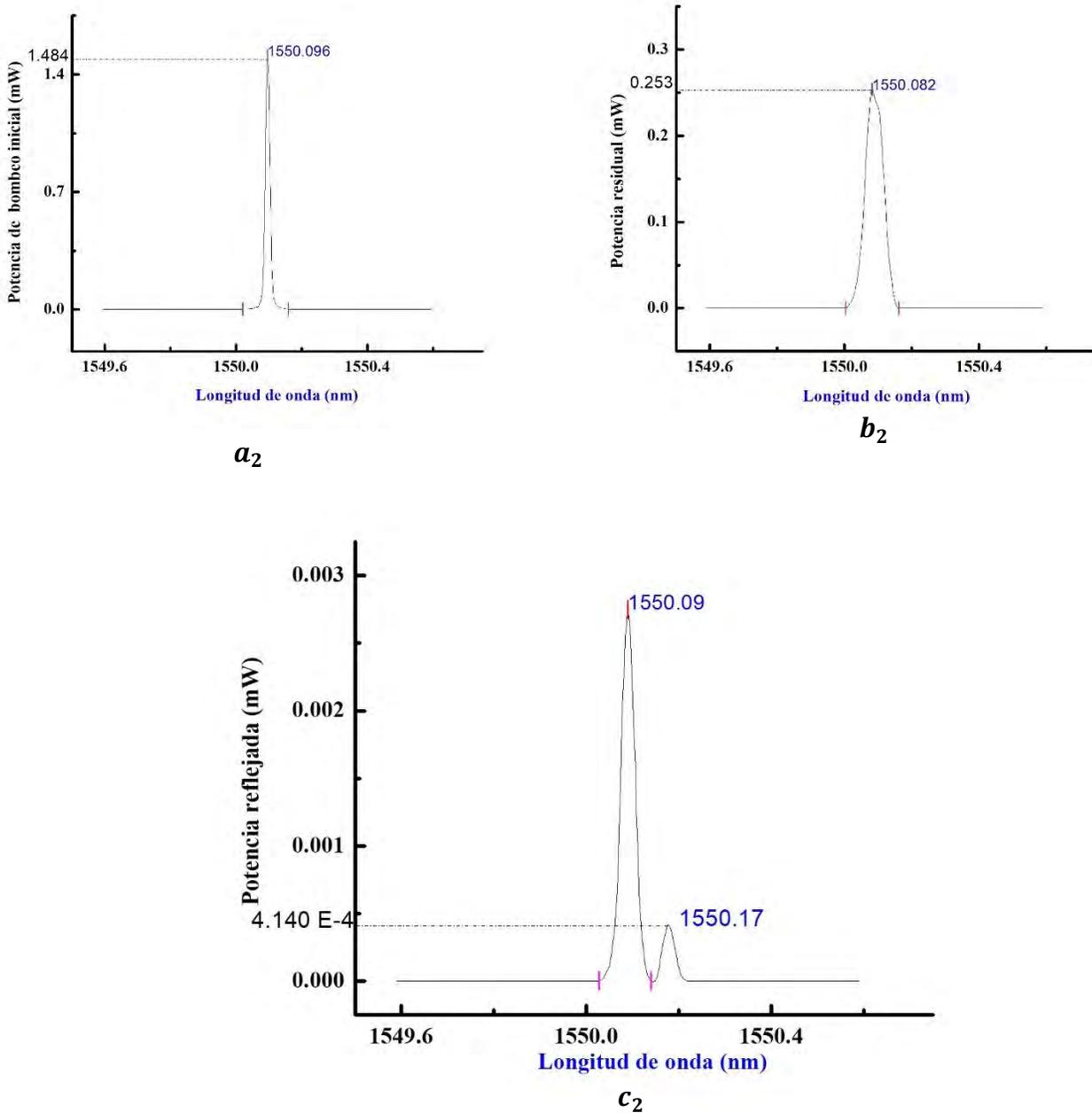


Figura 26. Graficas de pruebas, donde se observa la potencia de bombeo, la potencia de bombeo residual y el desarrollo del stock de Brillouin

En la Figura 26 la evolución del stock de Brillouin va en aumento, aunque aún sigue en menos de un cuarto de tamaño a comparación de Rayleigh. Esto es notable mientras va en aumento de aproximadamente 0.4 mW en la potencia de bombeo.

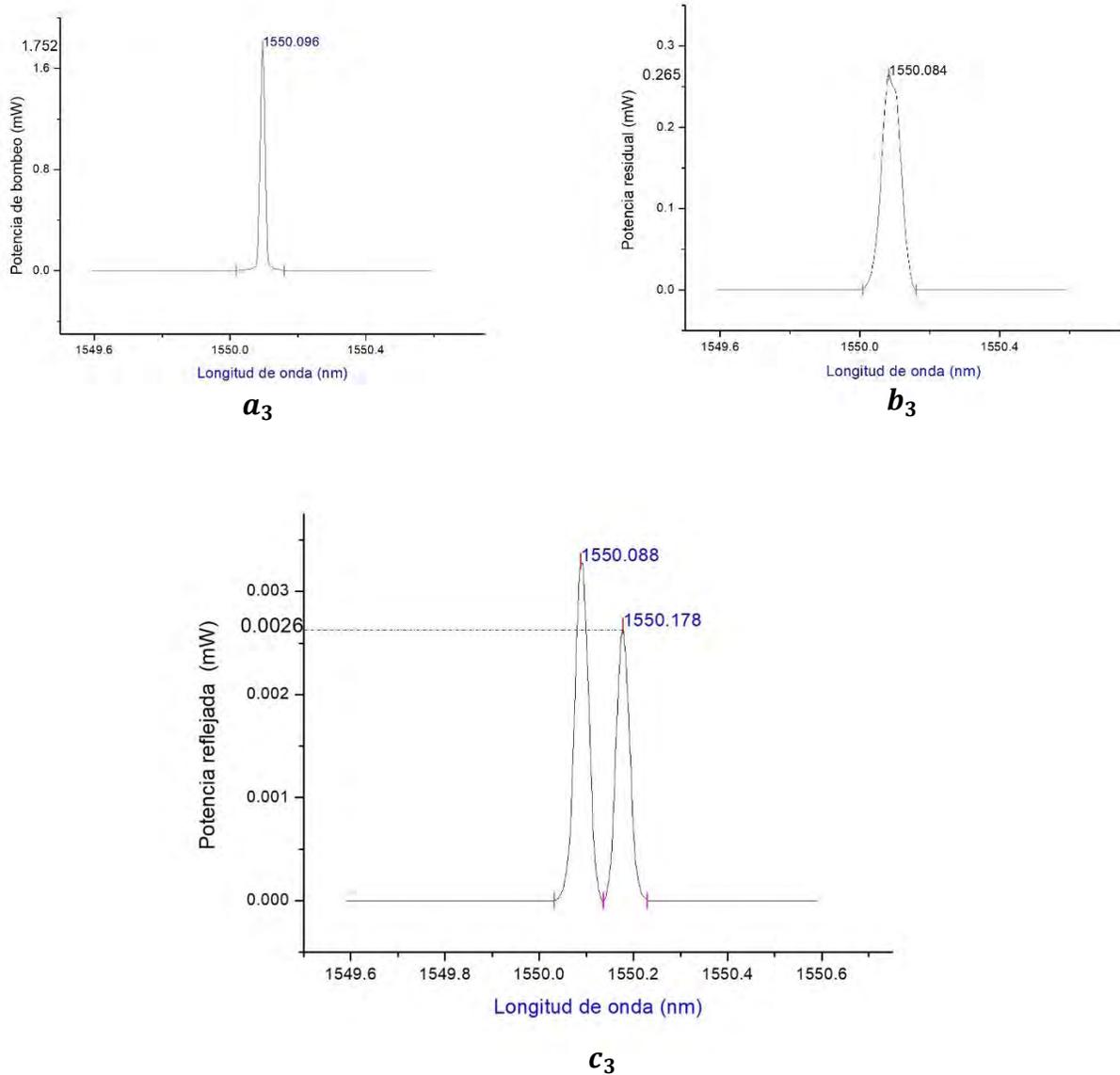


Figura 27. Graficas de pruebas, donde se observa la potencia de bombeo, la potencia residual y el stock de brillouin tomando casi la forma del stock de Rayleigh

El aumento de la potencia de bombeo de 0.312mW en la Figura 27 a_3 ha generado que el stock de Brillouin, vaya igualándose a la potencia de Rayleigh. Mientras la potencia de bombeo residual sigue siendo reducida de forma mínima con un valor de potencia de bombeo residual de 0.265 mW.

En la Figura 28 las cosas van cambiando ya que se aprecia como el stock de Brillouin es mayor al de Rayleigh y esto ha sido logrado con el aumento de potencia de bombeo a 0.146mW.

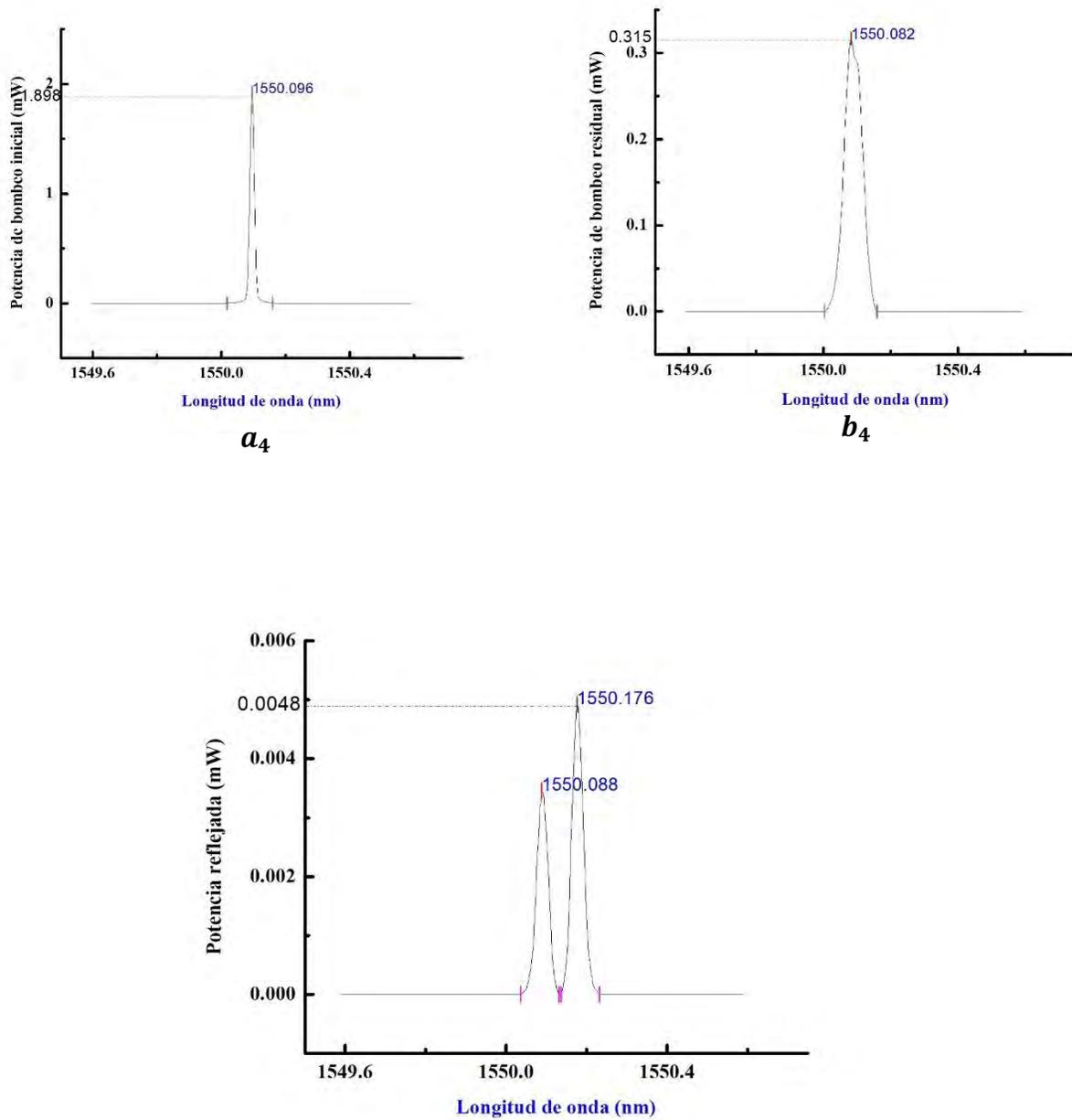


Figura 28. Graficas de pruebas, donde se observa la potencia de bombeo, potencia de bombeo residual y la potencia residual donde el stock de Brillouin es mayor.

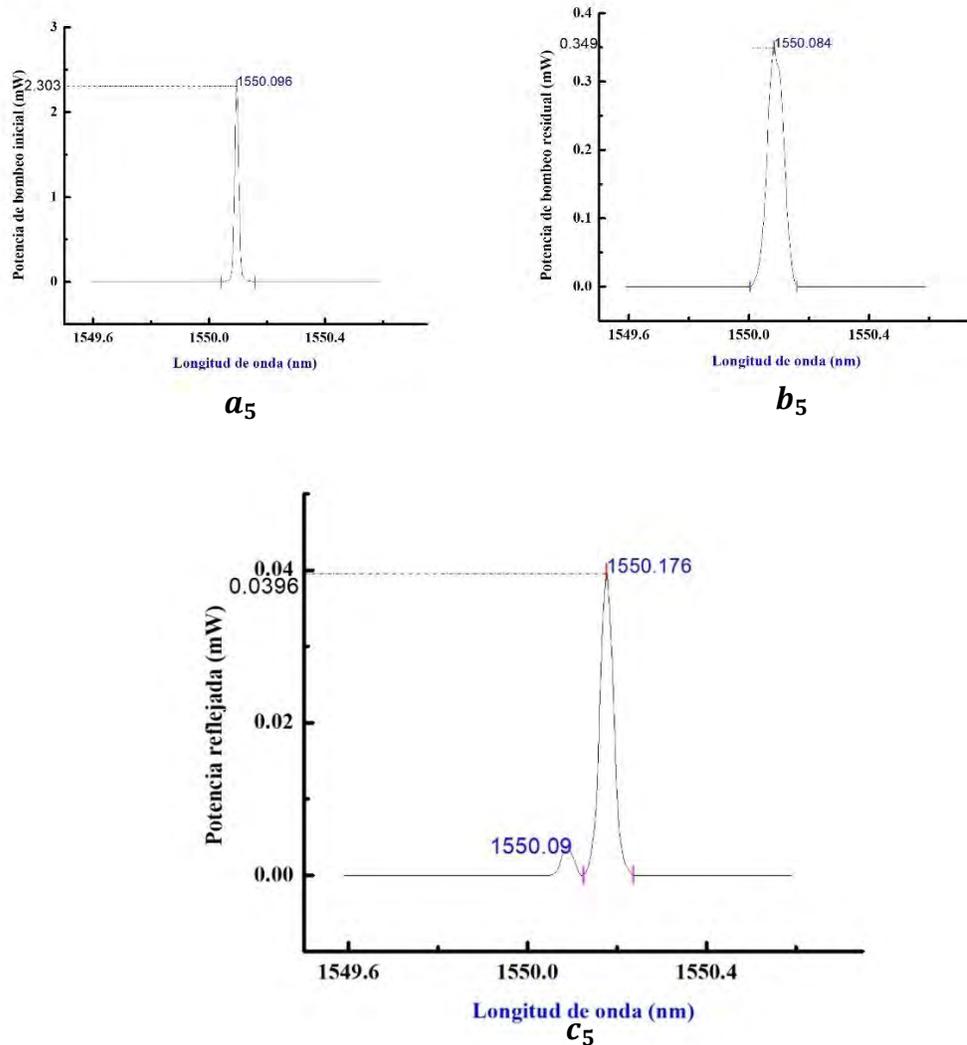


Figura 29. Graficas de pruebas, donde se observa la potencia de bombeo, potencia de bombeo residual y la potencia reflejada la cual el stock de Brillouin es mayor y el stock de Rayleigh es muy pequeña

En la Figura 29 se observa como el stock de Brillouin ha evolucionado y es mayor a la potencia de Rayleigh, mientras Rayleigh va desapareciendo. Esto es logrando mientras la potencia de bombeo ha sido aumentada a 2.303 mW, la cual es 1.29 mW de aumento a comparación de la Figura 25a₁.

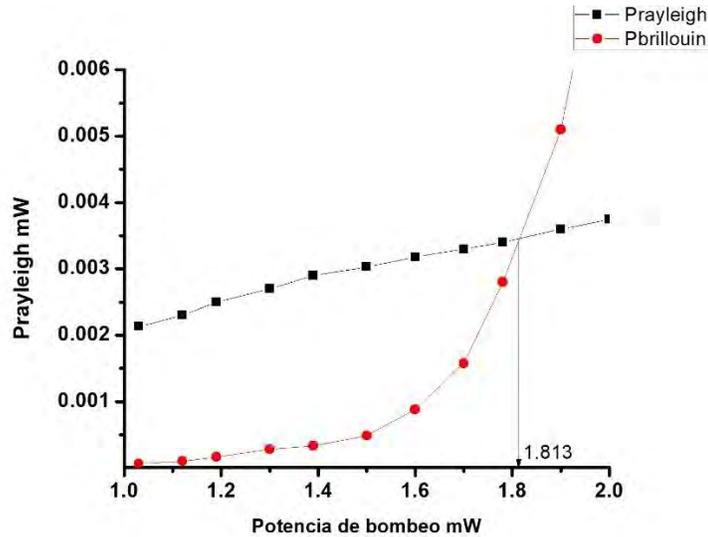


Figura 30. Umbral de Rayleigh y Brillouin

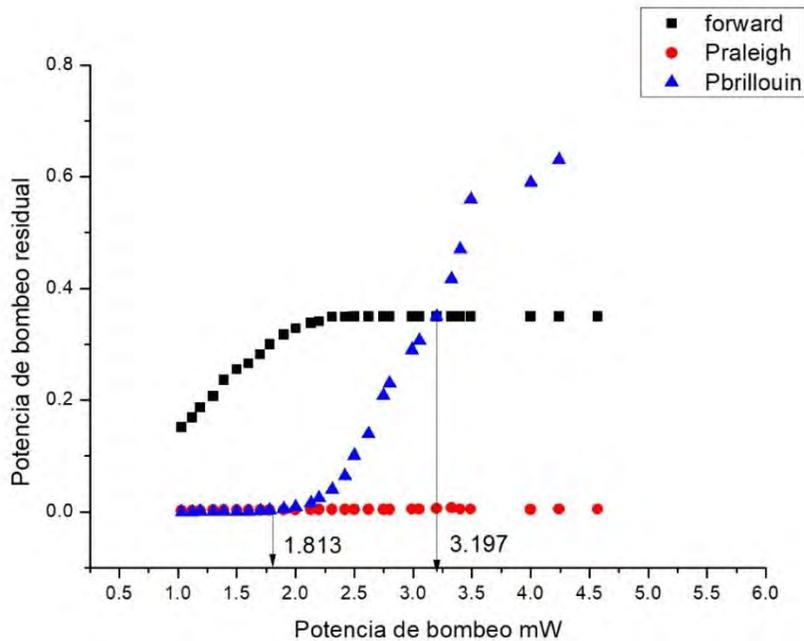


Figura 31 Evolución de las potencias respecto a la potencia de bombeo suministrada al inicio de la fibra (solución experimental)

Las pruebas realizadas en este experimento se pueden resumir con la Figura 31, en la cual podemos observar con claridad el comportamiento y la evolución de las potencias con respecto a la potencia de bombeo suministrada al inicio de fibra. De acuerdo con la Figura 31, dos puntos críticos se observaron y se tomaron en cuenta, el primero fue a que potencia se observa el umbral de potencia entre Rayleigh y Brillouin, como se puede ver en la Figura 30, se encontró que para alcanzar el umbral en 25 km de fibra SMF-28 se requiere una potencia de bombeo 1.813mW. Otra de las deducciones con respecto al a Figura 31 es que el punto donde el Stoke de Brillouin y la señal residual tienen la misma forma es cuando la potencia de bombeo está a una potencia de 3.197mW.

CONCLUSIONES

En el presente proyecto de tesis hemos estudiado experimentalmente el efecto Brillouin, el cual es uno de los fenómenos no lineales más importantes que deben ser considerados en el diseño de los sistemas de comunicaciones ópticos. También hemos estudiado teóricamente que el SBS requiere de muy poca potencia en el bombeo para que aparezca, mientras que en el caso de SRS cuyas ecuaciones son muy similares, se requiere de mucha potencia para poder generar los Stokes.

En muchas ocasiones ocurren pérdidas en la señal en la fibra y no logramos entender lo que está sucediendo, el SBS es uno de esos fenómenos no lineales que ocurren en las comunicaciones ópticas y en muchas ocasiones nos preguntamos qué está sucediendo con la señal de bombeo, en nuestra investigación se pudo observar la razón por la cual sucede, como sucede y la caracterización del fenómeno SBS.

En la caracterización del esparcimiento Brillouin estimulado en 25 km de fibra SMF-28 se pudieron deducir varias conclusiones basadas en el análisis experimental y las mediciones obtenidas en el OSA. Uno de los puntos de interés era a qué potencia de bombeo se genera el primer stock de Brillouin en los 25 km de fibra, se pudo obtener ese dato mediante la generación de una gráfica correspondiente a los datos obtenidos del OSA, en la cual se pudo observar que se requiere una potencia de bombeo de 1.013mW para obtener dicho stock de Brillouin. Se pudo observar también, a través de las gráficas como fue la evolución de la potencia de bombeo residual con respecto al de Brillouin. Finalmente, otro de los puntos de interés fue obtener el umbral de potencia de bombeo del Stoke Brillouin, se pudo concluir que para que el Stoke Brillouin y el Stoke de Rayleigh tengan un umbral, se requiere una potencia de bombeo de 1.813mW en los 25km de fibra SMF-28. Mientras para que el Stoke de Brillouin y señal de potencia de bombeo residual tengan el mismo tamaño se requiere una potencia de bombeo de 3.197mW.

El comportamiento del fenómeno fue como se esperaba ya que en previas investigaciones se había estudiado su comportamiento teórico; sin embargo, nuestro objetivo era observar ese comportamiento en 25km de fibra SMF-28 de manera práctica, mediante el uso adecuado de dispositivos y equipos ópticos adecuados.

GLOSARIO

Apertura numérica (NA). La apertura numérica de una fibra óptica define una característica de la fibra con respecto a su aceptación de luz incidente. El “grado de abertura,” “habilidad de juntar luz,” y “cono de aceptación” son términos que describen estas características.

Absorción. Conversión de energía óptica en calor. Se expresa como decibels por kilómetro (dB/km).

Amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA). Un amplificador óptico que utiliza una fibra activa metida en erbio y una fuente de bomba (laser) para hacer más grande o amplificar la señal óptica.

Ancho de banda. Una medida de la frecuencia máxima por la cual la intensidad de la luz puede ser modulada antes de que la señal experimente atenuación de exceso de 3dB. Por más grande que sea el ancho de banda, más grande es la capacidad para llevar información. Ancho de banda de fibra se expresa en mega Hertz (Mhz) por kilómetro (km).

Ancho del espectro. Una medida de la extensión de la longitud de onda de un espectro. Se utiliza para determinar la anchura óptica de la fuente de luz con los LED y los láseres en sistemas ópticos. También se conoce como anchura de línea. Anchura típica de espectro para un LED son 20nm a 60nm y para un diodo de láser, 1nm a 5nm.

Ancho de Pulso. El intervalo de tiempo de la duración de un pulso.

Angulo de aceptación. Angulo máximo en que la luz es aceptada por una fibra; el Angulo crítico, medio desde el eje central del núcleo, mediante el cual el núcleo de una fibra óptica acepta luz de entrada.

Atenuación. El termino general utilizado para describir la disminución de energía de un punto hasta le otro. En fibras ópticas, la pérdida de poder óptico por unidad se expresa logarítmicamente en decibels por kilómetro (dB/km) en una longitud de onda específica.

Decibels (dB). Una unidad logarítmica que describe la proporción de dos energías, voltaje o corriente.

Diafonía. Denominada en ingles *Crosstalk*. Acoplamiento magnético o capacitivo entre circuitos próximos o consecuencia de los desequilibradores

Dispersión. La causa de las limitaciones del ancho de banda en una fibra. Dispersión hace que los pulsos de entrada lleguen a ser más anchos a lo largo de la fibra. Dos tipos predominantes son: a) Dispersión modal que es causada por las longitudes diferenciales del camino óptico en una fibra multimodo. b) Dispersión material que es causada por una demora diferencial de varias longitudes de onda de luz en un material de guía de onda.

Dispersión cromática. El efecto de una combinación de dispersión de material y de guía de onda.

Dispersión de guía de onda. La distorsión de un modo debido a las propiedades geométricas de la guía de onda.

Distorsión. Un cambio en la figura de la forma de onda de una señal.

Fibras Ópticas. Transmisión de luz por fibras ópticas para la comunicación, incluyendo voz, video y datos.

Índice de refracción. La proporción de la velocidad de luz en un vacío y la velocidad de luz en un material.

Laser. Una fuente coherente de luz con un ancho de espectral muy angosto.

Multicanalización de división de longitud de onda (WDM). La combinación de dos o más señales ópticas para transmisión sobre una vía óptica común, usualmente una fibra simple.

Polarización. Un término usado para decir la orientación de los vectores de los campos eléctricos y magnéticos de una onda electromagnética propagante. Una teoría de ondas electromagnéticas describe en detalle la propagación de señales ópticas (luz).

ACRÓNIMOS

OSA: Optical spectrum analyzer

BER: Bit Error Rate

EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier

SDM: Spatial Division Multiplexing

TDM: Time Division Multiplexing

WDM: Wavelength Division Multiplexing

SRS: Stimulated Raman Scattering

SBS: Stimulated Brillouin Scattering

MUX: Multiplexer

FWM: Four-Wave Mixing

SPM: Self-Phase Modulation

XPM: Cross-Phase Modulation

SMF: Single-Mode Fiber

Gbps: Giga bits per second

Nm: nano meter

mW: miliwatts

pW: picowatts

μm: micrometer

REFERENCIAS

- [1] G.P. Agrawal, [Fiber-Optic Communication Systems], JhonWiley&Sons, Inc. Publication, New York, C.A, (2003).
- [2] J. A. Buck, [Fundamental of Optical Fibers], Wiley series, John & Sons, chapter 7- 8 (2004).
- [3] Y. Aoki, Kazuhito Tajima, and Ikuo, “Input Power Limits of Single-Mode Optical Fibers due to Stimulated Brillouin Scattering in Optical Communication Systems”, J. of Lightwave Technology, Vol. 6, No. 5, (1988).
- [4] C. McIntosh, U A. Yeniay, and J. Toulouse, “Stimulated Brillouin Scattering in Dispersion-Compensating Fibers”, Optical Fiber Technology, vol. 3, (1992).
- [5] G.P. Agrawal, [Nonlinear Fiber Optics], Academic Press, San Diego, C.A, (2007).
- [6] José Capmany, F. Javier Fraile-Pelaez, Javier Marti. [Fundamentos de Comunicaciones Ópticas.] Síntesis, Espana (1999).
- [7] M J Hekmat, et al., “Study of the stimulated Brillouin scattering power threshold in high power double-clad fiber Lasers”, Laser Phys., 23, (2013).
- [8] B. P. Lathi, Modern Digital and Analog Communication Systems, Oxford University Press, New York, 1995.
- [9] Boyd, R. W., Nonlinear Optics, Academic Press, SanDiego, CA, 1992.
- [10] M. Schwartz, Information Transmission, Modulation, and Noise, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 1990.
- [11] W. R. Bennett, Communication Systems and Techniques, IEEE Press, Piscataway, NJ, 1995.
- [12] Tkach, R.W., A.R.Chraplyvy, and R.M.Derosier, “Spontaneous Progress In Electromagnetics Research, PIER 74, 2007 403 Brillouin scattering for single-mode optical fiber characterization,” Electron. Lett., Vol. 22, 1986.
- [13] Mao, X. P., R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, R. M. Jopson, and R. M. Dorosier, “Stimulated Brillouin threshold dependence on fiber type and uniformity,” IEEE Photonics Tech. Lett., Vol. 4, 1992.

APENDICE 1 HOJA DE DATOS DE FIBRA SMF-28

Maximum Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value* (dB/km)
1310	≤ 0.32
1383**	≤ 0.32
1490	≤ 0.21
1550	≤ 0.18
1625	≤ 0.20

* Alternate attenuation offerings available upon request.

** Attenuation values at this wavelength represent post-hydrogen aging performance.

Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1285 – 1330	1310	0.03
1525 – 1575	1550	0.02

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α .

Macrobend Loss

Mandrel Radius (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
10	1	1550	≤ 0.50
10	1	1625	≤ 1.5
15	10	1550	≤ 0.05
15	10	1625	≤ 0.30
25	100	1310, 1550, 1625	≤ 0.01

*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified radius.

Point Discontinuity

Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1310	≤ 0.05
1550	≤ 0.05

Cable Cutoff Wavelength (λ_{cc})

$\lambda_{cc} \leq 1260$ nm

Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD (μ m)
1310	9.2 ± 0.4
1550	10.4 ± 0.5

Dispersion

Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm·km)]
1550	≤ 18.0
1625	≤ 22.0

Zero Dispersion Wavelength (λ_0): 1304 nm ≤ λ_0 ≤ 1324 nm

Zero Dispersion Slope (S_0): $S_0 \leq 0.092$ ps/(nm²·km)

Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/√km)
PMD Link Design Value	≤ 0.04*
Maximum Individual Fiber PMD	≤ 0.1

*Complies with IEC 60794-3: 2001, Section 5.5, Method 1, (m = 20, Q = 0.01%), September 2001.

The PMD link design value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD_Q). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled.

APÉNDICE 2 HOJA DE DATOS DE ANALIZADOR DE ESPECTRO ÓPTICO

AQ6370C

Items	Specifications		
	Standard (-10)	High performance (-20)	
Wavelength range ^{*1}	600 to 1700 nm		
Span ^{*1}	0.5 nm to 1100 nm (full span), and 0 nm		
Wavelength accuracy ^{*1, *2, *3}	±0.02 nm (1520 to 1580 nm) ±0.02 nm (1580 to 1620 nm) ±0.04 nm (1450 to 1520 nm) ±0.10 nm (Full range)	±0.01 nm (1520 to 1580 nm) ±0.02 nm (1580 to 1620 nm) ±0.04 nm (1450 to 1520 nm) ±0.10 nm (Full range)	
Wavelength linearity ^{*1, *2, *3}	±0.01 nm (1520 to 1580 nm), ±0.02 nm (1450 to 1520 nm, 1580 to 1620 nm)		
Wavelength repeatability ^{*1, *2}	±0.005 nm (1 min.)		
Wavelength resolution setting ^{*1, *3}	0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1 and 2 nm		
Wavelength resolution accuracy ^{*1, *2, *3}	±5% (1450 to 1620 nm, Resolution setting: ≥ 0.1 nm, Resolution correction: ON, Number of sampling: AUTO)		
Min. sampling resolution ^{*1}	0.001 nm		
Number of sampling	101 to 50001, AUTO		
Level sensitivity setting	NORM_HOLD, NORM_AUTO, NORMAL, MID, HIGH1, HIGH2 and HIGH3		
High dynamic mode	SWITCH (Sensitivity: MID, HIGH1-3)		
Level sensitivity ^{*2, *3, *4, *7}	-90 dBm (1300 to 1620 nm), -85 dBm (1000 to 1300 nm), -60 dBm (600 to 1000 nm) (Sensitivity: HIGH3)		
Maximum input power ^{*2, *3}	+20 dBm (Per channel, full range)		
Maximum safe input power ^{*2, *3}	+25 dBm (Total input power)		
Level accuracy ^{*2, *3, *4, *5}	±0.4 dB (1310/1550 nm, Input level: -20 dBm, Sensitivity: MID, HIGH1-3)		
Level linearity ^{*2, *3}	±0.05 dB (Input level: -50 to +10 dBm, Sensitivity: HIGH1-3)		
Level flatness ^{*2, *3, *4}	±0.1 dB (1520 to 1580 nm), ±0.2 dB (1450 to 1520 nm, 1580 to 1620 nm)		
Polarization dependence ^{*2, *3, *4}	±0.05 dB (1550/1600 nm), ±0.08 dB (1310 nm)		
Dynamic range ^{*1, *2, *3}	Resolution: 0.02 nm	55 dB (Peak ±0.2 nm) 37 dB (Peak ±0.1 nm)	58 dB (Peak ±0.2 nm, Typ. 60 dB) 45 dB (Peak ±0.1 nm, Typ. 50 dB)
	Resolution: 0.05 nm	73 dB (Peak ±1.0 nm) 62 dB (Peak ±0.4 nm) 45 dB (Peak ±0.2 nm)	73 dB (Peak ±1.0 nm, Typ. 78 dB) 64 dB (Peak ±0.4 nm, Typ. 70 dB) 50 dB (Peak ±0.2 nm, Typ. 55 dB)
	Resolution: 0.1 nm	57 dB (Peak ±0.4 nm) 40 dB (Peak ±0.2 nm)	60 dB (Peak ±0.4 nm, Typ. 67 dB) 45 dB (Peak ±0.2 nm, Typ. 50 dB)
Stray-light suppression ratio ^{*1, *8}	73 dB	76 dB (Typ. 80 dB)	
Optical return loss ^{*11}	Typ. 35 dB (with angled-PC connector)		
Applicable fiber	SM (9.5/125 μm), GI (50/125 μm, 62.5/125 μm)		
Optical connector	Optical input : AQ9447 (□□) Connector adapter (option) required. Calibration output: AQ9441 (□□) Universal adapter (option) required. (□□) Connector type FC, SC, or ST		
Built-in calibration light source	Wavelength reference source (For optical alignment and wavelength calibration)		
Sweep time ^{*1, *7, *9}	NORM_AUTO: 0.2 sec; NORMAL: 1 sec; MID: 2 sec; HIGH1: 5 sec; HIGH2: 20 sec; HIGH3: 75 sec		
Warm-up time	Minimum 1 hour (After warming up, optical alignment adjustment with built-in light source is required.)		

*1: Horizontal scale: Wavelength display mode.

*2: With 9.5/125 μm single mode fiber with a PC type connector, after 1 hour of warm-up, after optical alignment with built-in reference light source.

*3: Vertical scale: Absolute power display mode, Resolution setting: ≥ 0.05 nm, Resolution correction: OFF.

*4: With 9.5/125 μm single mode fiber (B1.1 type defined on IEC60793-2, PC polished, mode field diameter: 9.5 μm, NA: 0.104 to 0.107).

*5: After wavelength calibration with built-in reference light source.

*6: Temperature condition changes to 23 ±3°C at 0.05 nm resolution setting.

*7: High dynamic mode: OFF, Pulse light measurement mode: OFF, TLS sync sweep: OFF, Resolution correction: OFF.

*8: 1523 nm, High dynamic mode: SWITCH, Resolution correction: OFF

*9: Span: ≤ 100 nm, Number of sampling: 1001, Average number: 1.

*10: With He-Ne laser (1523 nm), 0.1 nm resolution setting, 1520 nm to 1620 nm except for peak wavelength ±2 nm.

*11: With Yokogawa's master single mode fiber with an angled-PC connector, Typ. 15 dB with PC connector.

APENDICE 3 HOJA DE DATOS DE LASER ITC510

Laser Controller Specifications

	ITC502	ITC510
Laser Controller:		
Current Control		
Current Control Range	0 to ±200mA	0 to ±1A
Compliance Voltage	>6V	
Setting Resolution (IEEE-488)	10µA (3µA)	100µA (15µA)
Measurement Resolution (IEEE-488)	10µA (1µA)	100µA (10µA)
Current Accuracy	±100µA	±1mA
Noise Without Ripple (10Hz to 10MHz, RMS, Typical)	<1.5µA	<5 µA
Ripple (50Hz, RMS, Typical)	<1.5µA	<3µA
Transients, Typical	<200µA	<1mA
Drift (24 hrs, @ Constant Amb. Temp, Typ.)	<10µA	<30µA
Temperature Coefficient	<50ppm/°C	
Power Control		
Control Range of Photocurrent	5µA to 2mA	
Setting Resolution (IEEE-488)	0.1µA (0.05µA)	
Measurement Resolution (IEEE-488)	0.1µA (0.01µA)	
Accuracy (Typical)	±2µA	
Reverse Bias Voltage	0 to 10V	
Current Limit		
Setting Range	0 to 200mA	0 to 1A
Resolution	10µA	100µA
Accuracy	±0.5mA	±2.5mA
Laser Voltage Measurement		
Measurement Principle	4-Wire	
Measurement Range	0 to 10V	
Resolution	1mV	
Accuracy	±20mV	
Analog Modulation		
Input Impedance	10kΩ	
Modulation Coefficient CC	20mA/V ±5%	100mA/V ±5%
3dB-Bandwidth at CC ¹⁾	0 to 500kHz	200kHz
Modulation Coefficient CP	0.2mA/V ±5%	
Control Output for Laser Current		
Output Impedance	10kΩ	
Transmission Coefficient	50V/A ±5%	10V/A ±5%

1) Small signal bandwidth. 2) All data valid at 23 ± 5°C and 45 ± 19% relative humidity.



ITC500 REAR PANEL

Temperature Controller Specifications

	ITC502	ITC510
Temperature Controller:		
Control Range of TEC Current	0 to ±2A	0 to ±4A
Compliance Voltage	>8V	
Maximum Output Power	16W	32W
Resolution of TEC Current (IEEE-488)	1mA (0.1mA)	
Accuracy of TEC Current	±10mA	±20mA
Resolution of TEC Voltage (IEEE-488)	1mV (0.1mV)	
Accuracy of TEC Voltage	±10mV	
Noise and Ripple Typical	<1mA	<2mA
Temperature Sensors:		
Thermistor		
Control Ranges	10Ω - 19.9kΩ / 100Ω - 199kΩ	
Resolution (IEEE-488)	1Ω (0.3Ω) / 10Ω (3Ω)	
Accuracy	±5Ω / ±50Ω	
Stability (24hrs)	±0.5Ω / ±5Ω	
IC Sensors AD590, AD592, or LM335		
Control Ranges ¹⁾	-45°C to ±145°C	
Resolution (IEEE-488)	0.01°C (0.003°C)	
Accuracy (Not LM335)	±0.1°C	
Stability (24hrs)	<0.002°C	

1) Limited by rating of sensor.

APÉNDICE 4 HOJA DE DATOS DE LASER THORLABS S3FC 1550

Item #		S3FC1310	S3FC1550
Wavelength	Minimum	1290 nm	1530 nm
	Typical	1310 nm	1550 nm
	Maximum	1330 nm	1570 nm
Spectrum ^a			
Full Output Power	Minimum	1.5 mW	
	Typical	2.0 mW	
Laser Class		1M	
Power Stability		15 min: ±0.05 dB, 24 hr:± 0.1 dB (After 1 hr Warm-up at 25 ± 10 °C Ambient)	
Display Accuracy (mW)		±10% of Actual	
Setpoint Resolution		0.01 mW	
Adjustment Range		~0 mW to Full Power	
TEC			
Stability		0.005 °C / 1 °C	
Setpoint Accuracy		±0.25 °C	
Setpoint Resolution		±0.1 °C	
Adjustment Range		20 ± 1 °C to 30 ± 1 °C	
Environmental			
Operating Temperature		15 to 35 °C	
Storage Temperature		0 to 50 °C	
AC Input		115/230 VAC (Switch Selectable) 50 - 60 Hz	
Modulation Input		0 - 5 V = 0 - Full Power, DC or Sinewave Input Only	
Modulation Bandwidth		5 kHz Full Depth of Modulation 30 kHz Small Signal Modulation	
Fiber		SMF-28e+	
Output Fiber Connector		FC/PC, Wide Key Compatible	