



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

---

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

---

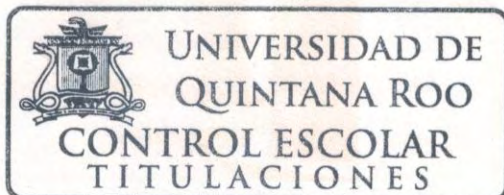
**TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERO EN REDES**

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN REDES**

**PRESENTA  
CESHIA KEDUSHA MENDOZA TORRES**

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

**ASESORES  
M.C. RAFAEL SÁNCHEZ LARA  
DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC  
M.C. FRANCISCO MÉNDEZ MARTÍNEZ  
DR. JAIME DIONISIO CUEVAS DOMÍNGUEZ**



**UNIVERSIDAD DE  
QUINTANA ROO  
CONTROL ESCOLAR  
TITULACIONES**



**DCI** **DIVISIÓN DE  
CIENCIAS E  
INGENIERÍA**



# UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

## DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

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

ELABORADO POR  
CESHIA KEDUSHA MENDOZA TORRES

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:

  
DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC

ASESOR:

  
M.C. FRANCISCO MÉNDEZ MARTÍNEZ

ASESOR:

  
DR. JAIME DIONISIO CUEVAS DOMÍNGUEZ



UNIVERSIDAD DE  
QUINTANA ROO  
CONTROL ESCOLAR  
TITULACIONES



DCI DIVISIÓN DE  
CIENCIAS E  
INGENIERÍA

## DEDICATORIA

Para mi Familia.

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios gracias.

Agradezco eternamente a mis padres que sin ellos yo no hubiese podido lograr esta meta. Gracias por siempre preocuparse por mí, por sustentarme y por estar para mí. Son mi mayor bendición. Indudablemente agradezco a mi familia por siempre alentarme y apoyarme. A mi hermano quien siempre me ha dicho que puedo llegar más alto.

Agradezco a mi novio y mejor amigo Alfredo Yam, por su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera universitaria, por su compañía y por siempre hacerme reír cuando todo parecía frustrante.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Homero Toral Cruz, mi maestro y director de tesis, quien se esforzó para que yo pudiera concluir satisfactoriamente mi carrera. Gracias sus desvelos y preocupaciones para que mi tesis esté concluida y así poder obtener mi titulación.

Muchas gracias al Dr. Rafael Sánchez, quien me orientó y ayudo para realizar esta tesis. Quien me estuvo ayudando para entender más a fondo este tema y poder así reproducir este efecto. Gracias por su ayuda y su dedicación.

# CONTENIDO

<b>DEDICATORIA</b> .....	1
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	4
<b>CONTENIDO</b> .....	5
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	7
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	8
<b>INDICE DE ECUACIONES</b> .....	10
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	11
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	12
1.1 Planteamiento del Problema .....	13
1.2 Antecedentes .....	14
1.3 Objetivo General .....	15
1.4 Objetivos Particulares .....	15
1.5 Metodología .....	15
1.6 Estructura del Trabajo .....	16
<b>CAPÍTULO 2. LAS FIBRAS ÓPTICAS</b> .....	17
2.1 Historia de las Fibras Ópticas .....	17
2.2 Características de las Fibras Ópticas .....	18
2.2.1 Estructura de la fibra óptica .....	18
2.2.2 Materiales de la fibra .....	19
2.2.3 Fabricación de la fibra óptica .....	19
2.2.4 Índice de refracción .....	21
2.2.5 Propagación .....	25
2.2.6 Espectro electromagnético .....	27
2.2.7 Pérdidas o atenuación .....	27
2.3 Resumen .....	31
<b>CAPÍTULO 3. LOS FENÓMENOS NO LINEALES EN LA FIBRA ÓPTICA</b> .....	33
3.1 SRS y SBS .....	34
3.2 SPM, XPM y FWM .....	36
3.3 Importancia de los Efectos No Lineales .....	37
3.4 Resumen .....	38

<b>CAPÍTULO 4. EL ESPARCIMIENTO RAMAN ESTIMULADO EN LA FIBRA ÓPTICA</b> .....	40
4.1 Conceptos Básicos.....	40
4.1.1 Stokes y anti-Stokes .....	40
4.1.2 Ganancia en el espectro Raman .....	42
4.1.3 Umbral de Raman .....	43
4.2 Aplicaciones de Raman .....	45
4.2.1 Uso como láser.....	45
4.2.2 Uso como amplificador .....	46
4.3 Resumen .....	48
<b>CAPÍTULO 5. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL</b> .....	49
5.1 Diagrama Experimental.....	49
5.2 Datos Teóricos .....	50
5.2.1 Láser.....	51
5.2.2 OSA .....	51
5.2.3 Fibra .....	52
5.2.4 Pérdidas .....	52
5.3 Medidas de Seguridad.....	53
5.4 Fusión de Fibras .....	53
5.5 Hipótesis o Expectativa .....	54
5.6 Resumen .....	54
<b>CAPÍTULO 6. RESULTADOS</b> .....	56
<b>CONCLUSIONES</b> .....	78
<b>REFERENCIAS</b> .....	80
<b>APENDICE 1. HOJA DE DATOS DEL LÁSER DE 10W</b> .....	81
<b>APENDICE 2. HOJA DE DATOS DEL OSA</b> .....	82
<b>APENDICE 3. HOJA DE DATOS DE LA FIBRA MONOMODO SMF-28</b> .....	83

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los tipos de fibras según su modo de propagación.....	26
Tabla 2. Tabla comparativa entre SBS y SRS .....	35
Tabla 3. Tabla comparativa entre SPM, XPM y FWM.....	36
Tabla 4. Tabla comparativa de Stokes.....	74

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes de la fibra óptica .....	18
Figura 2. Métodos químicos de fabricación de fibra óptica: (A)Método “Outside Vapor Deposition” (OVD), (B)Método “Modified Chemical Vapor Deposition” (MCVD), (C)Método “Vapor Axial Deposition” (VAD).....	20
Figura 3. Perfil de la fibra óptica .....	22
Figura 4. Índices de refracción .....	23
Figura 5. Tipos de fibras ópticas: (A) Fibra multimodo con salto de índice, (B) Fibra multimodo con índice gradual, (C) Fibra monomodo .....	25
Figura 6. Gráfica del espectro electromagnético .....	27
Figura 7. Perdidas por curvaturas .....	28
Figura 8. Empalme por fusión .....	29
Figura 9. (A)Empalme mecánico simple, (B) Empalme mecánico con gel .....	30
Figura 10. Pérdidas por absorción .....	30
Figura 11. Diagrama de esparcimiento Raman línea Stokes y Anti-Stokes.....	40
Figura 12. Representación de tres tipos de luz siendo dispersada.....	41
Figura 13. Ejemplo de ganancia Raman para una fibra de sílice con $\lambda_p=1 \mu m$ .....	43
Figura 14. Esquema básico de un láser Raman .....	45
Figura 15. Diagrama experimental.....	49
Figura 16. Evidencia de equipo instalado en laboratorio .....	50
Figura 17. Láser a 10W usado para SRS .....	51
Figura 18. Analizador de espectros ópticos (OSA) usado para la caracterización de SRS.....	51
Figura 19. 25Km de Fibra SMF-28 .....	52
Figura 20. Prueba 1: Potencia de bombeo baja, a 17.5% de 10 W .....	56
Figura 21. Prueba 2: Potencia de bombeo baja, a 20.0% de 10 W .....	57
Figura 22. Prueba 3: Potencia de bombeo a 1.2W, a 22.5% de 10 W .....	58
Figura 23. Prueba 4: Potencia de bombeo a 1.5W, a 25.0% de 10 W .....	58
Figura 24. Prueba 5: Potencia de bombeo a 1.7W, a 27.5% de 10 W .....	59
Figura 25. Prueba 6: Potencia de bombeo a 1.9W, a 30.0% de 10 W .....	60
Figura 26. Prueba 7: Potencia de bombeo a 2.2W, a 32.5% de 10 W .....	60
Figura 27. Prueba 8: Potencia de bombeo a 2.3W, a 33.5% de 10 W .....	61
Figura 28. Prueba 9: Potencia de bombeo a 2.3W, a 34.0% de 10 W .....	62
Figura 29. Prueba 10: Potencia de bombeo a 2.5W, a 35.0% de 10 W .....	62
Figura 30. Prueba 11: Potencia de bombeo a 2.7W, a 37.5% de 10 W .....	63
Figura 31. Prueba 12: Potencia de bombeo a 3.0W, a 40.0% de 10 W .....	64
Figura 32. Prueba 13: Potencia de bombeo a 3.3W, a 42.5% de 10 W .....	64
Figura 33. Prueba 14: Potencia de bombeo a 3.6W, a 45.0% de 10 W .....	65
Figura 34. Prueba 15: Potencia de bombeo a 3.9W, a 47.5% de 10 W .....	66
Figura 35. Prueba 16: Potencia de bombeo a 4.2W, a 50.0% de 10 W .....	67
Figura 36. Prueba 17: Potencia de bombeo a 4.5W, a 52.5% de 10 W .....	67
Figura 37. Prueba 18: Potencia de bombeo a 4.8W, a 55.0% de 10 W .....	68
Figura 38. Prueba 19: Potencia de bombeo a 5.1W, a 57.5% de 10 W .....	69
Figura 39. Prueba 20: Potencia de bombeo a 5.4W, a 60.0% de 10 W .....	70
Figura 40. Prueba 21: Potencia de bombeo a 5.7W, a 62.5% de 10 W .....	70



Figura 41. Prueba 22: Potencia de bombeo a 6.0W, a 65.0% de 10 W .....	71
Figura 42. Prueba 23: Potencia de bombeo a 6.3W, a 67.5% de 10 W .....	72
Figura 43. Prueba 24: Potencia de bombeo a 6.6W, a 70.0% de 10 W .....	72
Figura 44. Prueba 25: Potencia de bombeo a 6.9W, a 72.5% de 10 W .....	73
Figura 45. Comportamiento del Residual.....	75
Figura 46. Comportamiento del Stokes 1.....	76
Figura 47. Comportamiento del Stokes 2.....	77
Figura 48. Comportamiento del Stokes 3.....	77

## INDICE DE ECUACIONES

### Capítulo 2

Número de ecuación	Ecuación	Página
E.2.1	$n = \frac{c}{v}$	22
E.2.2	$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$	23
E.2.3	$\theta_c = \text{arcsen} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$	23
E.2.4	$\alpha_{dB} = -\frac{10}{L} \log \left( \frac{P_T}{P_0} \right)$	28

### Capítulo 3

Número de ecuación	Ecuación	Página
E.3.1	$P = \varepsilon_0 (x^{(1)} \cdot E + x^{(2)} : EE + x^{(3)} : EEE + \dots)$	33
E.3.2	$(IL_{\text{eff}})_{\text{bulk}} = \left( \frac{P}{\pi w_0^2} \right) \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = \frac{P}{\lambda}$	37
E.3.3	$(IL_{\text{eff}})_{\text{fibra}} = \int_0^L I(z) \exp(-\alpha z) dz = \left( \frac{P}{\pi w_0^2} \right) [1 - \exp(-\alpha L)]$	37
E.3.4	$\frac{(IL_{\text{eff}})_{\text{fibra}}}{(IL_{\text{eff}})_{\text{bulk}}} = \frac{\lambda}{\pi w_0^2 \alpha}$	38

### Capítulo 4

Número de ecuación	Ecuación	Página
E.4.1	$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s$	42
E.4.2	$\Omega = \omega p - \omega s$	43
E.4.3	$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s - \alpha_s I_s$	44
E.4.4	$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} g_R I_p I_s - \alpha_p I_p$	44
E.4.5	$\frac{g_R P_0^{cr} L_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}} \approx 16$	44

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>SIGLAS</b>	<b>SIGNIFICADO</b>	<b>TRADUCCION</b>	<b>CAPITULOS</b>
<b>CPM</b>	Cross-phase modulation	Modulación de fase cruzada	3, 4
<b>CW</b>	Continuos wave	Onda continua	4
<b>FWM</b>	Four Wave Mixing	Mezcla de cuatro ondas	1, 3
<b>MCVD</b>	Modified Chemical Vapor Deposition	Deposición química de vapor modificada	2
<b>OSA</b>	Optical Spectrum Analyzer	Analizador de espectros ópticos	1, 5, 6
<b>OVD</b>	Outside Vapor Deposition	Deposición de vapor exterior	2
<b>SBS</b>	Scaterring Brillouin Stimulated	Esparcimiento Brillouin estimulado	1, 2, 3
<b>SMF</b>	Single-Mode Fiber	Fibra monomodo	5, 6
<b>SPM</b>	Self-phase Modulation	Modulación de auto fase	1, 3, 4
<b>SRS</b>	Scaterring Ramman Stimulated	Esparcimiento Raman estimulado	1, 2, 3, 4, 5, 6
<b>VAD</b>	Vapor Axial Deposition	Deposición axial en fase de vapor	2
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing	División de longitud de onda	4
<b>XPM</b>	Cross-phase modulation	Modulación de fase cruzada	1, 3, 4

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Un sistema de comunicaciones por fibra óptica es un sistema que funciona a través de ondas de luz para transmitir información de un lugar a otro, dichos lugares pueden estar separados por unos metros o hasta cientos de kilómetros [1]. Las fibras ópticas han demostrado ser uno de los medios de transmisión más eficientes en los sistemas de comunicaciones; sin embargo, este medio de comunicación tiene también ciertas ventajas y desventajas, ya que al ser portadoras de mayor cantidad de información con una rapidez mayor a los materiales utilizados convencionalmente, con lleva de igual forma a efectos ópticos.

Uno de los efectos ópticos más importantes, ocurre al transmitir una señal en forma de luz a través de fibra óptica bajo ciertos parámetros, conocido como efectos ópticos no lineales. Los efectos ópticos no lineales es lo que resulta entre la interacción de la luz y el medio material de transmisión. Estos efectos no lineales son la respuesta de cualquier dieléctrico a intensos campos electromagnéticos y las fibras ópticas no son la excepción. Se han descubierto varios efectos no lineales en las fibras de sílice fundido, y cada uno afecta de manera diferente a los sistemas de transmisión óptica [2].

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) [2].
- El otro mecanismo se debe a la dependencia del índice de refracción del vidrio de la fibra óptica con la potencia a través del material. Los efectos no lineales producidos por este mecanismo son efectos de modulación, de los cuales se destacan: Auto-Modulación de Fase (SPM: Self-Phase Modulation), Modulación de Fase Cruzada (XPM: Cross-Phase Modulation), y Mezclado de 4ª. Onda (FWM) [2].

Estos fenómenos pueden presentar ventajas o desventajas, por ejemplo, en los sistemas de telecomunicaciones por fibra óptica, el SRS puede ser usado para construir amplificadores de fibra óptica para combatir el problema de la atenuación en la fibra, sin embargo, puede ser problemático en los canales de información. También es posible construir láseres sintonizables debido a las nuevas longitudes de onda que aparecen por SRS denominados Stokes, de ahí la importancia de caracterizar este fenómeno [3].

En este trabajo de tesis se presenta un estudio experimental del fenómeno no lineal conocido como el esparcimiento estimulado Raman (SRS) a través de 25km de fibra óptica SMF-28. Es decir, se caracterizaron las potencias de los Stokes Raman generados en la fibra óptica para obtener la caracterización de potencias. Una de las potencias de mayor importancia es cuando la potencia de entrada al canal de bombeo se iguala a la potencia del Stokes en el extremo de la fibra, denominada umbral de potencia de Stokes. Otra Potencia interesante es la

potencia máxima alcanzada por cada componente Stokes. El efecto SRS normalmente se obtiene con potencias de bombeo grandes, por ello se ha utilizado un láser a 1064 nm.

## 1.1 Planteamiento del Problema

Utilizar fibras ópticas como medio de comunicación tiene sus ventajas y sus desventajas; las fibras ópticas son portadoras de mayor cantidad de información a muy altas velocidades en comparación a los materiales utilizados en los medios de transmisión convencionales, sin embargo, son susceptibles a presentar efectos ópticos no deseados durante la transmisión.

Algunos de los principales efectos ópticos que se presentan durante la transmisión de información en fibras ópticas se denominan no lineales; estos efectos se llevan a cabo debido a la interacción de la luz y el medio material de transmisión. Se han descubierto varios efectos no lineales en fibras de sílice fundido, cada uno afectando de manera diferente a los sistemas de transmisión óptica.

Estos efectos no lineales son encontrados debido a dos mecanismos. Se producen por los niveles de potencias muy altas o muy bajas a través del fenómeno de dispersión causando el Esparcimiento Brillouin Estimulado (SBS) y el Esparcimiento Raman Estimulado (SRS). El segundo mecanismo será abordado en el presente proyecto de tesis y se debe a la dependencia del índice de refracción del vidrio con la potencia óptica a través del material, ya que los efectos no lineales, de este tipo, son producto de la dependencia del valor del índice de refracción con la potencia, mismos que son efectos de modulación llamados Auto-Modulación de Fase (SPM: Self-Phase Modulation), Modulación de Fase Cruzada (XPM: Cross-Phase Modulation), y Mezcla de Cuarta Onda (FWM).

Estos fenómenos pueden presentar ventajas o desventajas, por ejemplo en los sistemas de telecomunicaciones por fibra óptica, el SRS puede ser usado para construir amplificadores de fibra óptica para combatir el problema de la atenuación en la fibra, y sin embargo, puede ser problemático en los canales de información. También es posible construir láseres sintonizables debido a las nuevas longitudes de onda que aparecen por SRS denominados Stokes, de ahí la importancia de caracterizar este fenómeno.

En el presente proyecto de tesis se realizará un estudio experimental del fenómeno no lineal denominado "Esparcimiento Raman Estimulado (SRS)", sobre la fibra óptica SMF-28. Es decir, se caracterizará las potencias de los Stokes Raman generados observando el comportamiento de los mismos. Debido a que el efecto SRS normalmente se obtiene con potencias de bombeo grandes, se utilizará un láser a 10W, para realizar dicha caracterización. Una de las potencias de mayor importancia es cuando la potencia del canal de bombeo se iguala a la potencia del Stokes en el extremo de la fibra, a esta potencia de bombeo en el inicio de la fibra se le denomina Umbral de Potencia de Bombeo. Otra Potencia interesante es la

potencia máxima alcanzada por componente Stokes. Otro dato importante es saber cuántos Stokes Raman aparecen a cierta cantidad de potencia. Con base a lo mencionado anteriormente se desarrollará un estudio experimental para caracterizar las potencias citadas.

Para realizar dicha experimentación, se utilizó un láser de 10W, un Analizador de Espectros Ópticos (OSA), un rollo de fibra óptica SMF-28 de 25 Km, un posicionador nanométrico (NanoMax-TS) y el equipo para fusionar las fibras ópticas, dichos equipos y materiales fueron proporcionados por el laboratorio de óptica de la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), donde se realizó la experimentación correspondiente

## 1.2 Antecedentes

Las fibras ópticas son una herramienta que puede usarse en diversos sistemas de comunicación. Ya que pueden ser de mucha utilidad por sus diferentes características o fenómenos que presentan, pero también pueden presentar ciertas desventajas. Algunos de los efectos ópticos se denominan no lineales ya que se llevan a cabo debido a la interacción de la luz y el medio material de transmisión. Se han descubierto varios efectos no lineales en fibras de sílice fundido, cada uno afectando de manera diferente a los sistemas de transmisión óptica. En el presente trabajo se abordará el fenómeno no lineal llamado esparcimiento Raman estimulado el cual puede ser empleado en la construcción de láser, amplificadores, etc., o en su defecto para contrarrestarlo.

Algunos trabajos relacionados al estudio realizado en el presente proyecto, se mencionan a continuación:

- “Desarrollo de láser random de fibra óptica multilongitud de onda conmutable y reconfigurable en tiempo real para interrogación remota de sensores” de Verónica Miguel Soto, donde expone la creación de un láser usando fibra SMF y con bombeo Raman a 1450nm.
- “Estudio y simulación de los efectos no lineales Scattering estimulado de Brillouin y Scattering estimulado de Raman”, por Henry A., Pamela Molida y María Soledad. Donde simulan dos fenómenos no lineales causados por la dispersión y observan el comportamiento.
- “Statistical Analysis on Stimulated Raman Crosstalk in Dispersion-Managed Fiber Links”, por Toshiaki Yamamoto, donde hace un estudio de degradación de potencia por el fenómeno no lineal SRS.

Motivados por los resultados de los trabajos mencionados anteriormente, en este proyecto se evalúa mediante experimentación las potencias críticas de los componentes Stokes generados

por esparcimiento Raman estimulado en 25 Km de fibra SMF-28 con canal de bombeo a 1064 nm.

### 1.3 Objetivo General

Caracterizar mediante experimentación las potencias críticas de los componentes Stokes generados por Esparcimiento Raman Estimulado en 25 Km de fibra SMF-28 con canal de bombeo a 1064 nm.

### 1.4 Objetivos Particulares

- Encontrar las potencias máximas y mínimas alcanzadas por la componente Stokes.
- Obtener en el extremo de la fibra, el Umbral de Potencia de Bombeo.
- Obtener la evolución de potencias de bombeo residual y componente de Stokes Raman con respecto a la variación de la potencia de bombeo.
- Encontrar cuál es la potencia de bombeo mínima y la distancia mínima en la cual se presenta el fenómeno llamado Esparcimiento Raman Estimulado.

### 1.5 Metodología

El proceso para realizar este trabajo se muestra a continuación:

- Estudio teórico de los fenómenos no lineales que interactúan en la fibra óptica, profundizando el fenómeno SRS con el objetivo de conocer sus principales características.
- Selección de los componentes ópticos y construcción del arreglo experimental: láser de bombeo a 1064 nm, 25 Km. de fibra óptica SMF-28 y Analizador de espectro óptico (OSA).
- Caracterización de las potencias de bombeo del láser de 1064 nm.
- Obtención de diferentes curvas de espectro de potencia de salida mediante el OSA, variando la potencia del canal de bombeo a 1064 nm.
- Procesamiento y análisis de los datos de medición obtenidos con el OSA mediante software matemático (ORIGIN) para poder extraer las potencias críticas.

## 1.6 Estructura del Trabajo

El capítulo 1 presenta una introducción a este trabajo de tesis. Se presenta el planteamiento del problema, antecedentes, los objetivos y metodología.

El capítulo 2 presenta los conceptos básicos, las características y componentes de las fibras ópticas.

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

El capítulo 4 presenta un estudio detallado del fenómeno SRS.

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

El capítulo 6 presenta los resultados del análisis y caracterización realizada del trabajo.

Finalmente se presentan las conclusiones y las referencias.



## CAPÍTULO 2. LAS FIBRAS ÓPTICAS

### 2.1 Historia de las Fibras Ópticas

En el año de 1800, se empezaron a usar las primeras comunicaciones eléctricas, tal fue el caso del código Morse, que permitió la comunicación a largas distancias [1]. Unos años después del código Morse, en 1876 fue inventado el teléfono, mediante el cual las señales eléctricas tuvieron mayor importancia, debido a que el teléfono funcionaba de manera analógica con una corriente eléctrica que estaba variando continuamente. El sistema telefónico en un principio usaba pares de cables y más adelante evoluciono a cables coaxiales que permitían el manejo de mayor capacidad de transmisión de información. La primera vez que se colocó un cable coaxial fue en 1940 al transmitir a una televisión más de 300 canales de voz, teniendo una capacidad de 3MHz.

Para los años entre 1950 y 1960 se creó el primer laser y se pudo dar una demostración de su funcionamiento como dispositivo óptico. Para algunos autores, a partir de este momento comienza la era de las fibras ópticas, de la necesidad de un medio transportador para este laser y de la necesidad que este laser transporte información. Según Agrawal las primeras fibras ópticas de vidrio se fabricaron en 1920, sin embargo, se no se utilizaron para las comunicaciones hasta 1966; sin embargo, el gran problema de estas primeras fibras ópticas eran las pérdidas. Las primeras pérdidas registradas eran de 1000 dB/km, lo cual era muy alto. Al ir avanzando en las investigaciones para los años de 1970 las pérdidas fueron disminuyendo llegando a 20 dB/km, utilizando aproximadamente longitudes de onda de  $1\mu\text{m}$  y cambiando el material de la fibra de vidrio a sílice. Fue hasta 1979 que se logró una aproximación en la longitud de onda de  $1.55\mu\text{m}$  gracias al avance en la fabricación de las fibras de sílice haciendo así una disminución a la pérdida de menos de 0.2 dB/km [2].

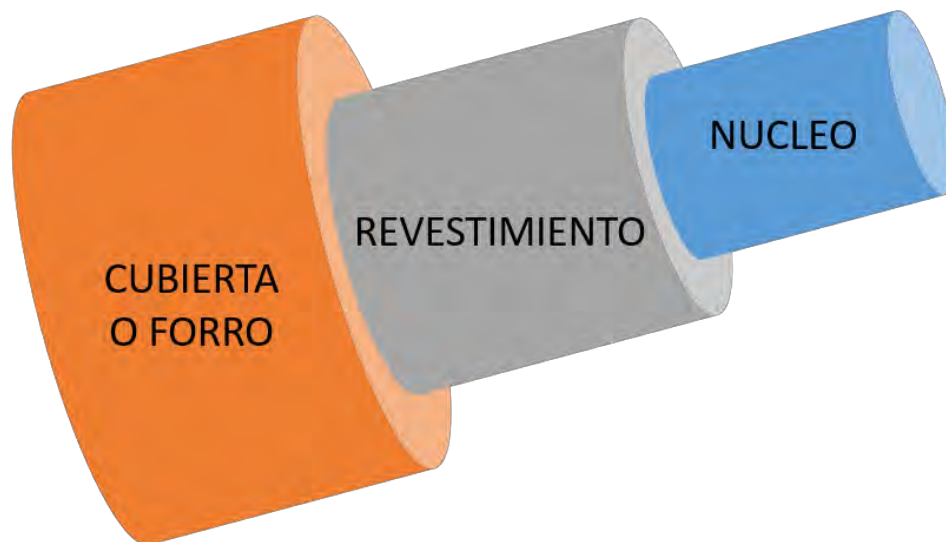
En este punto, al estar probando estas fibras ópticas con baja pérdida se descubrieron los efectos no lineales en las mismas, creando una nueva rama de estudio. Algunos de los efectos no lineales descubiertos que produce la fibra óptica según sus variantes se descubrieron los causados por el índice de refracción (SPM, CPM y FWM) y por la estimulación (SBS y SRS) [2].

Después de todos estos descubrimientos y avances para la mejora de las comunicaciones se hicieron más pruebas y más experimentos llevando a dopar las fibras con elementos de tierras raras, mismas que se usaron como amplificadores y láseres. Cabe mencionar que los amplificadores ya existían para 1964, pero su desarrollo se hizo más notorio hasta 1987, y se comenzó a usar de manera más comercial para 1995 [2].

## 2.2 Características de las Fibras Ópticas

### 2.2.1 Estructura de la fibra óptica

De manera general, las fibras ópticas cuentan con un núcleo que es por el cual la luz del láser se mueve, es como un tubo de vidrio, dentro de otro tubo de vidrio el cual es llamado revestimiento y generalmente cuentan con una cubierta o forro de plástico, aunque no siempre lo tienen. Cabe mencionar que también se cuentan con fibras de plástico, pero para fines de esta tesis serán más mencionadas las de vidrio. Este esquema anteriormente mencionado está ilustrado en la Figura 1, donde la parte naranja es la cubierta o forro que cubre la fibra óptica, esto con el fin de protegerla de polvo, manejarla con mayor facilidad y las capas interiores se encuentren en mejores condiciones, entre otros. La fibra óptica es flexible hasta cierto punto, pero no elástica. La parte gris de la Figura 1 es el revestimiento, este revestimiento tiene la función de atrapar la luz en el núcleo de la fibra al tener menos índice de refracción en comparación del núcleo de la fibra, usando una la técnica de reflexión interna total. Los materiales y los métodos de fabricación serán mencionados más adelante en este capítulo de la tesis [1].



*Figura 1. Partes de la fibra óptica*

Cabe mencionar que para hacer diferenciación física de las fibras ópticas cuando tienen su cubierta o forro de plástico, según el estándar TIA-598C, la fibra monomodo tendrá una cubierta de color amarillo y la fibra multimodo tendrá cubierta color naranja. Sin embargo, no siempre es muy confiable por lo que para mayor seguridad es mejor leer las especificaciones de la fibra.

### 2.2.2 Materiales de la fibra

Por otra parte, el material que se usa para las fibras ópticas con poca pérdida es de vidrio de sílice puro sintetizado por fusión de moléculas de  $SiO_2$ . Se puede hacer diferencia entre el revestimiento de la fibra y el núcleo haciendo un uso selectivo de dopantes durante el proceso de fabricación. Con dopantes se refiere a la introducción de un elemento químico que está destinado para cambiar las propiedades de un material. Dependiendo de cuál tipo de dopante se utilice es el índice de refracción o característica que se obtendrá en la fibra óptica [2].

Por ejemplo, para aumentar el índice de refracción en el núcleo se usan dopantes como el  $GeO_2$  y el  $P_2O_5$ ; esto es, óxido de germanio y óxido de fósforo, respectivamente. Mientras que hay dopantes que disminuyen el índice de refracción como el boro ( $B_2O_3$ ) y dopantes como flúor, los cuales son mayormente utilizados para el revestimiento [2].

También se pueden agregar dopantes a la fibra para obtener características que mejoren el desempeño de la fibra dependiendo de su uso. Por ejemplo, si se requiere el uso de fibra óptica para láseres o amplificadores el núcleo de sílice se dopará con erbio ( $ErCl_3$ ) y óxido de neodimio ( $Nd_2O_3$ ). Por otro lado, si se quiere controlar el espectro de ganancia en un amplificador se puede usar una fibra dopada con óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) [2].

### 2.2.3 Fabricación de la fibra óptica

Para poder fabricar y lograr una fibra óptica de buena calidad, es necesario utilizar varios métodos que solo se pueden realizar con tecnología bastante sofisticada, pues de esta forma se puede garantizar que la fibra sea uniforme en su tamaño de núcleo y en el perfil del índice [2] [4].

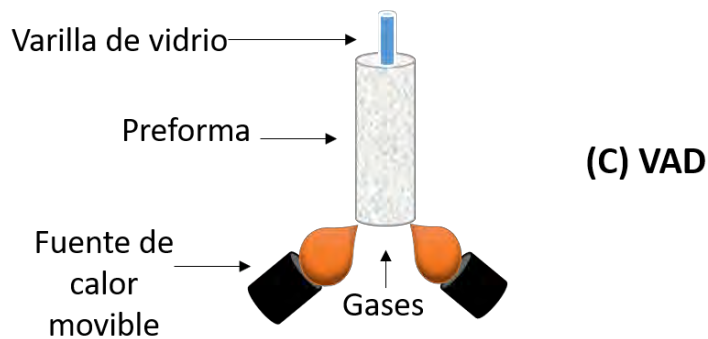
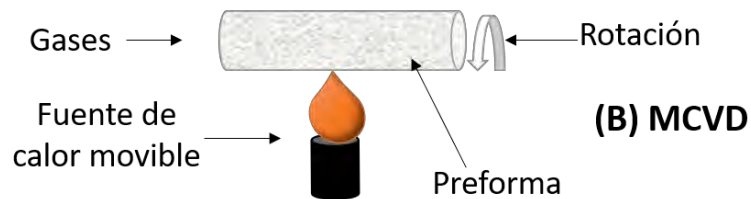
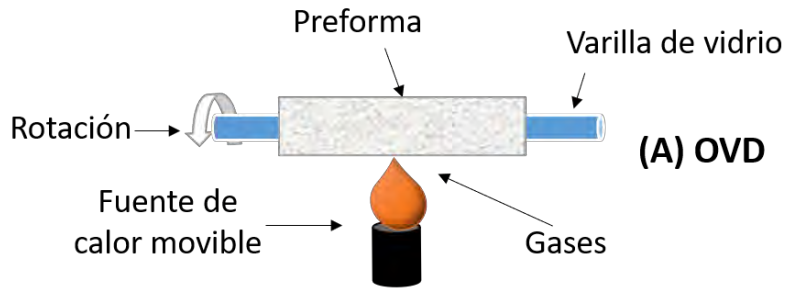


Figura 2. Métodos químicos de fabricación de fibra óptica: (A) Método "Outside Vapor Deposition" (OVD), (B) Método "Modified Chemical Vapor Deposition" (MCVD), (C) Método "Vapor Axial Deposition" (VAD)

Básicamente su fabricación cuenta con dos etapas. La primera de ellas se usa un método de deposición de vapor en el que se logra hacer una preforma cilíndrica con el perfil de índice que se requiere y los tamaños relativos para el revestimiento del núcleo. Generalmente una preforma típica es de 1m de largo y 2 cm de diámetro. Para la segunda etapa, la preforma se dibuja en una fibra usando un mecanismo de alimentación de precisión que lo va alimentando a la velocidad adecuada. Durante este proceso, se conservan las dimensiones relativas del revestimiento del núcleo, mencionado en la primera etapa. Para poder hacer esta preforma se pueden usar tres métodos.

Los tres métodos mayormente usados son los de la Figura 2. El método (A) es la deposición de vapor exterior. Para este método es necesario una varilla de vidrio colocada dentro de una cámara y en un torno para girarse rápidamente. Después se pasa una serie de gases controlados a computadora entre la varilla y la fuente de calor. Con cada pasada de la fuente de calor, una cierta cantidad del gas se fusiona a la parte externa de la varilla de vidrio.

Entonces al tener las capas necesarias, la varilla de vidrio se retira y lo que queda de los gases se vuelve una varilla sólida. La preforma es tomada y se lleva a lo que le llaman torre para que por medio de otro proceso sea estirada hasta el tamaño que se requiera la fibra.

El método (B) es la deposición química de vapor modificada, en este método, se toma la preforma hueca de 1m de largo y 2cm de diámetro y se coloca en un torno, ya sea horizontal o vertical, para hacerla girar rápidamente. Una mezcla de gases que se controla por computadora es pasada por dentro de la preforma, mientras que en el exterior de la preforma, una fuente de calor con oxígeno e hidrogeno se encuentra subiendo y bajado. Entonces al igual que en el método anterior, cada pasada va haciendo que se fusione una pequeña capa de elementos, en este caso la mayor parte del gas es dióxido de silicio ( $SiO_2$ ) o en otras palabras vidrio, sin embargo, hay solo algunas cantidades de impurezas controladas para así hacer las fibras dopadas y de esta forma poder cambiar el índice de refracción. De tal forma que, al estar en movimiento colocando los gases, se va haciendo una capa de vidrio dentro de la antorcha, con las características controladas, se puede ir cambiando los dopantes en cada pasada, de esta manera el índice de refracción puede variar. Después de acumular todas las capas deseadas, se colapsa al elevar la temperatura de la antorcha y se convierte en una varilla solida pero gruesa, también denominada preforma. Después se lleva a una torre de dibujo donde se estira y esta preforma de 1m de largo puede llegar a medir 10km de largo una vez estirada.

El método (C) es la deposición axial en fase de vapor. Para este proceso es necesario una varilla de vidrio corta, esta se coloca en un extremo y se suspende. Se aplican los gases controlados entre el extremo de la varilla y las fuentes de calor. Después se van alejando las fuentes de calor según se alarga la preforma. Se logra alargar debido al hollín causado por la fusión de los gases. Después de que se fusiona la longitud deseada se retira la varilla de vidrio, dejando así la preforma de hollín que se formó. Después de esto se lleva a la llamada torre de extracción donde se alarga a la longitud deseada.

#### 2.2.4 Índice de refracción

La manera más sencilla de explicar el índice de refracción es suponiendo que hay un haz de luz que viaja por un medio, este medio puede ser el vacío, e ingresa a otro medio que puede ser el vidrio, ocurrirá que cuando una parte de toda la luz se refleja la otra parte de la luz le ocurre lo que se llama refracción, esto es que cambia de dirección. Un ejemplo muy popular es cuando se introduce una parte de un objeto en agua, lo que es destacable es que la parte sumergida de este objeto se ve quebrado o chueco debido a la luz que se está reflejando en dicho objeto, es decir, la luz que choca con todo el objeto, puesto que la luz viaja a diferente velocidad en el aire lo podemos percibir de una forma, mientras que al viajar en el agua la luz se percibe de otra, causando así lo que llamamos diferencia de índice de refracción entre ambos medios (aire y agua). El índice de refracción, se utiliza para poder calcular tanto el ángulo de incidencia, como el ángulo de refracción del haz [5].

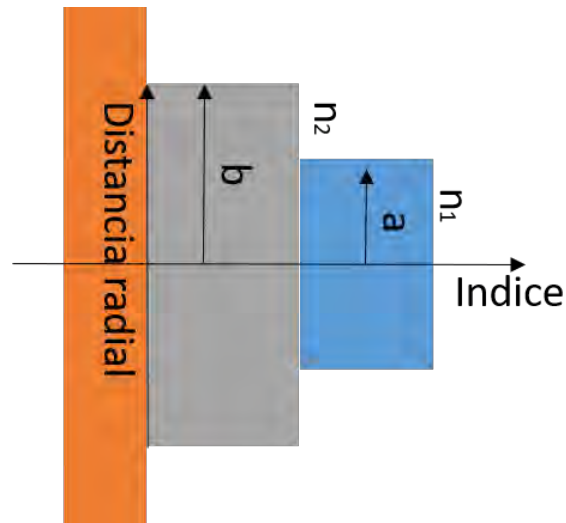


Figura 3. Perfil de la fibra óptica

De manera que, podría decirse que la definición para el índice de refracción sería la relación que hay entre la velocidad que viaja la luz en el vacío sobre la velocidad que viaja la luz en un medio, es decir, se calcula que tanto se reduce la rapidez de la luz al conducirse por un medio. Por lo que el índice de refracción se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$(E.2.1) \quad n = \frac{c}{v}$$

Donde:

$n$  = es el índice de refracción

$c$  = es la velocidad de la luz en el vacío

$v$  = es la velocidad de la luz en el medio

Al decir la velocidad de la luz en el medio se refiere al material en el que se mueve la luz, puede ser agua, aire, etc., mismo que es calculable. Siempre la velocidad en el vacío será  $n=1$ , y en cualquier otro medio será  $n>1$ , ya que la luz se mueve más rápido en el vacío que en cualquier otro medio.

Como se puede apreciar en la Figura 3, la parte azul que simboliza el núcleo de una fibra es marcado con un índice de refracción ( $n_1$ ) siempre mayor que el índice de refracción del revestimiento ( $n_2$ ). Hay fibras con índice de refracción escalonado o gradual e índice de paso. De igual forma los índices de refracción pueden ser observados en la Figura 5; en la cual, se muestra en la columna del centro de cada fibra el perfil según el tipo de fibra, mismo que se describe en la siguiente sección. Se puede observar que la figura color naranja y la figura color azul están hechas con índice de refracción escalonado o también conocido de paso. La figura del centro color gris tiene índice gradual, por eso disminuye su índice de refracción conforme va del centro hacia los límites del núcleo [2].

Al interponer un plano cartesiano en el perfil de una fibra óptica como se muestra en la Figura 3 y la Figura 5 (columna central), el eje horizontal vendría siendo el índice de refracción mientras que el eje vertical sería la distancia radial. De forma que, al hacer lo anterior, se podría apreciar mejor el papel que juega el índice de refracción para las fibras ópticas.

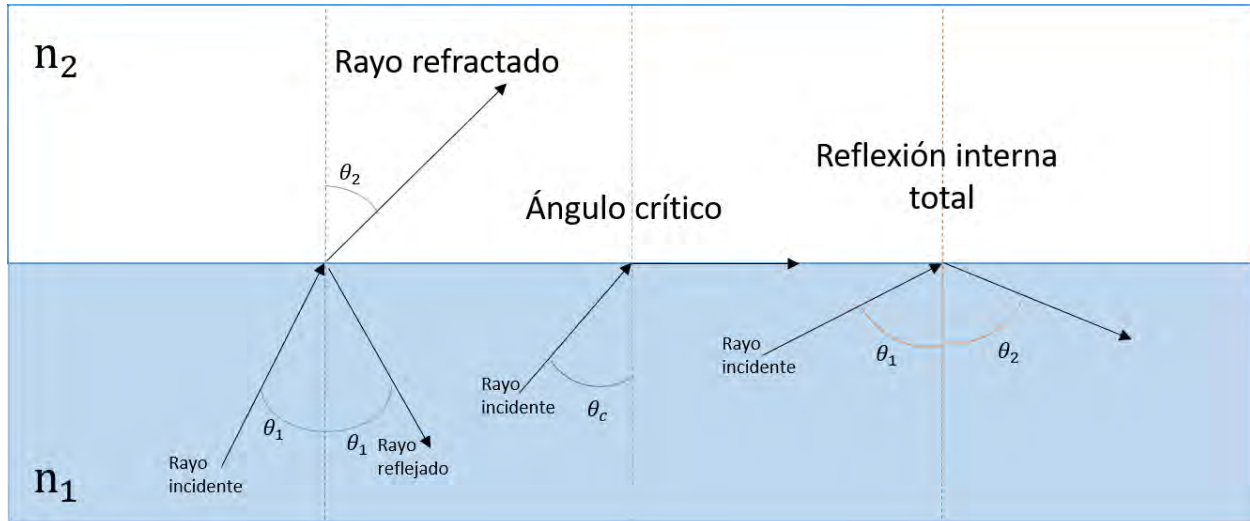


Figura 4. Índices de refracción

En la Figura 4, las flechas son el rayo de luz que viene desde una sustancia o medio, al que podemos llamar  $n_1$ , y pasa a otro material o medio, al que llamaremos  $n_2$ , ambos tienen diferentes índices de refracción. Suponiendo que  $n_2 > n_1$ , entonces  $\text{sen } \theta_2 < \text{sen } \theta_1$ , por lo que entre menor sea el seno, menor será el ángulo. Por esta razón, el ángulo que hace el rayo refractado  $\theta_2$  es menor que el ángulo  $\theta_1$  que provoca el rayo incidente. Como se puede ver en la Figura 4, también se provoca un rayo reflejado, que se encuentra en el mismo material que el rayo incidente [1].

La ley de Snell se aplica a estas situaciones. Su ecuación es la siguiente:

$$(E.2.2) \quad n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

Con esta ecuación podemos sacar el ángulo al que estará el rayo reflejado. El ángulo crítico es cuando se coloca el rayo incidente de tal forma que el ángulo refractado forma un ángulo de  $90^\circ$ , es decir, no habría realmente rayo refractado, solo rayo reflejado, en la Figura 4 se aprecia en el centro. El ángulo crítico se representa así:  $\theta_c$ , y este ángulo en el rayo de incidencia en la superficie que hace separación entre dos medios distintos, haciendo así al ángulo refractado de  $90^\circ$ , el mismo se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$(E.2.3) \quad \theta_c = \text{arcsen} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$$

Donde:

$\theta_c$  = es el ángulo crítico, en radianes.

$n_1, n_2$  = índices de refracción absolutos de los respectivos medios en los que se mueve el rayo incidente.

Para  $n_1$  y  $n_2$ , son una magnitud adimensional con valor que se puede calcular a partir de la velocidad que tiene la luz en el vacío y en el respectivo medio según la Ecuación E.2.1 [1].

A parte del ángulo crítico, se puede encontrar la reflexión interna total o la reflexión total en un medio, esto cuando  $n_1$  es mayor que  $n_2$  y no existe un ángulo refractado solo hay un rayo reflejado, al igual que en el ángulo crítico. La diferencia entre el ángulo crítico y la reflexión interna total es que cuando hay ángulo crítico, el rayo reflejado hace un ángulo de 90° grados y en la reflexión interna total el ángulo es mayor al ángulo crítico [5]. Lo anterior se puede observar al lado derecho de la Figura 4.

Es importante saber acerca de la reflexión interna total ya que es en lo que está basada la fibra óptica. Ya que es imposible que la luz viaje como un solo haz recto por el centro de la fibra, al chocar con el borde entre el núcleo y la cubierta, provoca la reflexión total, por lo que pasa del núcleo por el que va hacia el revestimiento. Ya que la reflexión interna total sigue la llamada "ley de la reflexión", se puede decir que el ángulo de entrada siempre será igualado al de la salida, por lo tanto, se mantiene el ángulo en las siguientes reflexiones [5].

Es posible mantener la mayor parte de la luz que viaja por la fibra óptica en el núcleo ya que debido a, como se dijo antes, sus índices de refracción tanto del núcleo como del revestimiento son distintos. Y esto es suficiente para que cuando la luz choca con el revestimiento la luz pueda rebotar dejando así que la luz siga viajando por el núcleo, siendo posible solo cuando el ángulo con el que viajan los haces de luz por el núcleo son mayores que el ángulo crítico y así provocar la reflexión interna total.



## 2.2.5 Propagación

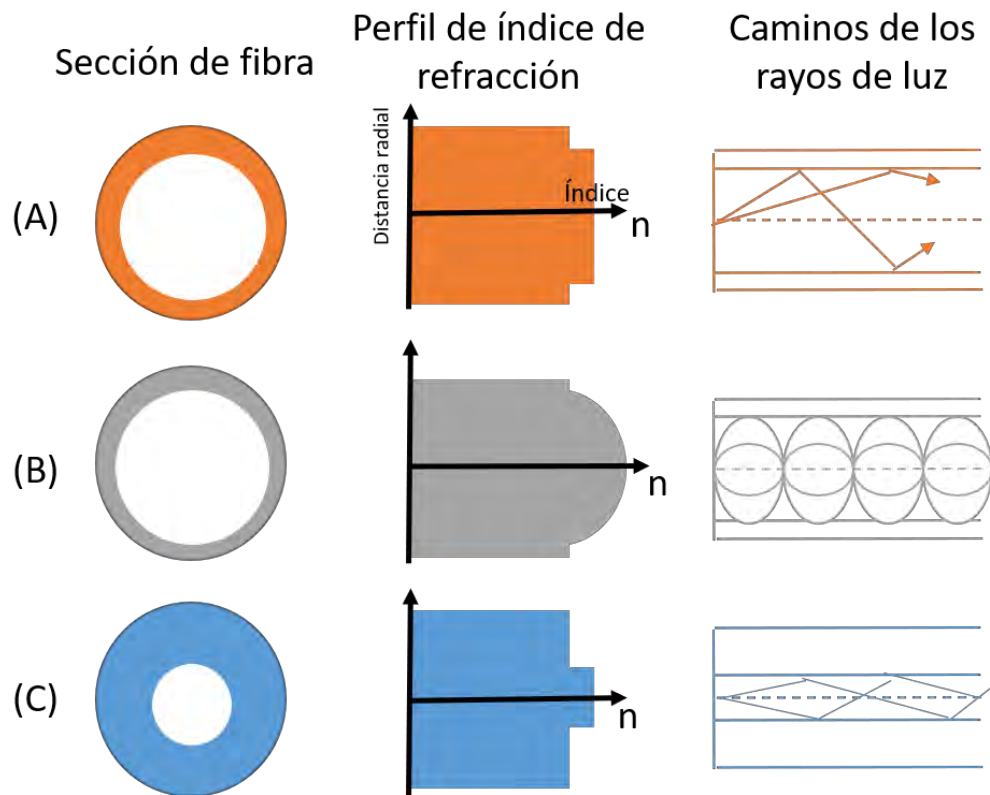


Figura 5. Tipos de fibras ópticas: (A) Fibra multimodo con salto de índice, (B) Fibra multimodo con índice gradual, (C) Fibra monomodo

Así como las fibras cuentan con índices graduales y de salto de índice. También están las fibras monomodo y multimodo. Esto significa que las fibras aceptan un haz de luz por modo o varios. Es decir, si sobrepusiéramos un plano cartesiano sobre una sección de fibra, cada eje del plano cartesiano aceptaría solo un modo o haz de luz si fuese el caso de una fibra monomodo, sin embargo, si fuese el caso de una fibra multimodo aceptaría más de un modo por eje. Como se puede observar en la Figura 5, los diseños (A) y (B) muestran fibras multimodo, pero con diferentes tipos de índice y puede notarse que su núcleo es más grande que la fibra (C) ya que esta es una fibra monomodo tiene su núcleo más chico. La mayoría de las fibras que se usan para estudiar los efectos no lineales son monomodo [1].

La fibra multimodo con índice escalonado tiene la característica de tener un índice de refracción constante, a diferencia de la fibra multimodo de índice gradual que su característica principal referente al índice de refracción va variando hasta alcanzar un punto máximo en el centro del núcleo [1].

En la Tabla 1 se presentan las mayores diferencias que se encuentran entre la fibra monomodo y multimodo, así como sus ventajas y desventajas según su utilidad. Como se puede observar la fibra monomodo es mucho mejor para ofrecer mayor capacidad de transporte de información ya que al tener un recorrido directo y tener una menor dispersión lo hace ideal

para estos casos. Sin embargo, la fibra multimodo es más fácil para su instalación ya que al contar con un núcleo más amplio lo hace más sencillo al instalar el transmisor con la fibra multimodo y la fibra con el receptor, en un sistema de comunicaciones [5].

Tabla 1. Características de los tipos de fibras según su modo de propagación

Tipo de fibra	Diámetros	Ventajas	Desventajas	Utilidad en:
Monomodo	Núcleo: ≈ 8.6 a 9.4μm Revestimiento: ≈ 150μm	Menor dispersión	Requiere un recorrido muy directo Complejo para implementar.	Ideal para estudiar efectos no lineales.
Multimodo índice gradual	Núcleo: ≈ 50 a 62.5μm Revestimiento: ≈ 150μm	Varios recorridos, fácil de implementar.	Mayor dispersión que en fibra monomodo pero menor que en multimodo de índice escalonado	Ideales para usarse con transmisores LED y láseres.
Multimodo índice escalonado	Núcleo: ≈ 50 a 62.5μm Revestimiento: ≈ 150μm	Varios recorridos, fácil de implementar	Mayor dispersión.	Ideales para usarse con transmisores LED y láseres.

En la Tabla 1 se muestra como una desventaja de las fibras monomodo que requiere un recorrido muy directo, es considerado como desventaja ya que en un sistema de comunicaciones o en caracterización de fenómenos con distancias largas de fibras, presentará pérdidas por curvaturas (descritas más adelante), por lo que un recorrido de un haz de luz muy directo es casi imposible ya que tendría que estar muy recta la fibra óptica monomodo para que se logren las menores pérdidas.

En la Tabla 1 se muestra como ventaja que la fibra monomodo tenga una menor dispersión, y como desventaja de ambas fibras multimodo es que tienden a generar mayor dispersión, esto porque al tener mayor dispersión, quiere decir que la señal de salida será muy distinta a la señal de entrada ya que presentará pérdidas de señal. Sin embargo, puede observarse en la Tabla 1 que hay diferencia entre las fibras multimodo, ya que al tener un índice gradual en la fibra, el índice de refracción va decreciendo conforme se avanza hacia las orillas del núcleo de la fibra lo que genera que haya una reducción entre los diferentes modos de propagación como se puede ver en la Figura 5, parte gris a la derecha, contrario a la de índice escalonado. Este efecto de dispersión se encuentra descrito más adelante en este mismo capítulo.

Ya que el núcleo de las fibras multimodo es grande comparado con las monomodo, puede usarse con transmisores LED o láseres, a diferencia de fibras monomodo que

únicamente pueden usarse con láseres ya que su núcleo es más pequeño y debe ser un solo recorrido lo más recto posible en el centro del núcleo.

### 2.2.6 Espectro electromagnético

La luz es considerada una onda electromagnética ya que le es posible oscilar en distintas frecuencias, mismas que hacen definición del color. Por ejemplo, se ha estudiado y concluido que la luz blanca es comprendida por todas las longitudes de onda.

Se podría definir el espectro electromagnético como una gráfica donde se ubican las longitudes de onda, frecuencias o las energías de las ondas electromagnéticas en relación con la potencia. Como puede observarse en la Figura 6, esta gráfica es mayormente utilizada por personas que se dedican a la óptica, pues en ella se encuentra en el eje “y” la potencia y en el eje de las “x” la longitud de onda [2].

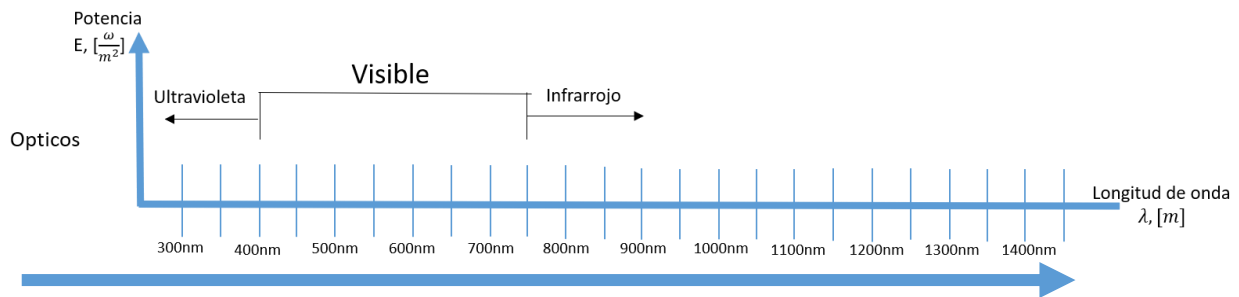


Figura 6. Gráfica del espectro electromagnético

Se puede observar en la Figura 6, los diferentes rangos de longitud de onda marcados para el espectro ultravioleta, el espectro visible y el infrarrojo. Generalmente para fibras ópticas se utiliza el rango visible que va de los 400nm a los 700nm, pero cabe mencionar que para el ámbito de las telecomunicaciones por fibras ópticas es más usual el rango infrarrojo, es decir, con longitudes de onda mayores, muy por arriba de los 700nm.

### 2.2.7 Pérdidas o atenuación

Un parámetro de suma importancia al estudiar las fibras ópticas es la pérdida de potencia durante la transmisión. Con pérdidas se refiere a la disminución de potencia, es decir, la señal enviada no es la misma que la de salida por cambios que sufre durante el traslado de la señal. Las pérdidas suceden por diversos factores ya sea físicos o por dispersión. Mismos factores que se explicaran en esta sección [2].

Es importante conocer los tipos de pérdidas ya que hasta la más mínima curvatura de la fibra puede ocasionar pérdidas de potencia, de manera que, si se va a usar la fibra óptica es necesario conocer este tema pues puede afectar el desempeño de una comunicación.

Dicha pérdida puede medirse con la siguiente formula [2]:

$$(E.2.4) \quad \alpha_{dB} = -\frac{10}{L} \log \left( \frac{P_T}{P_0} \right)$$

Donde:

$P_0$  = es la potencia inicial, la que se lanza por la entrada de la fibra óptica.

$L$  = es la longitud de la fibra óptica

$P_T$  = es la potencia transmitida

$\alpha$  = la atenuación en dB o pérdida en dB

La Ecuación E.2.4, no nos dice dónde está la pérdida o donde se ocasiona la disminución de potencia, pero si dice cuanto se ha disminuido la potencia durante la transmisión. Es decir, esta ecuación nos sirve para saber la cantidad de pérdida de transmisión en la fibra óptica. El resultado obtenido puede ayudarnos a darnos una idea de que también instalada la fibra óptica o si se está usando correctamente.

#### 2.2.7.1 Pérdidas por curvaturas

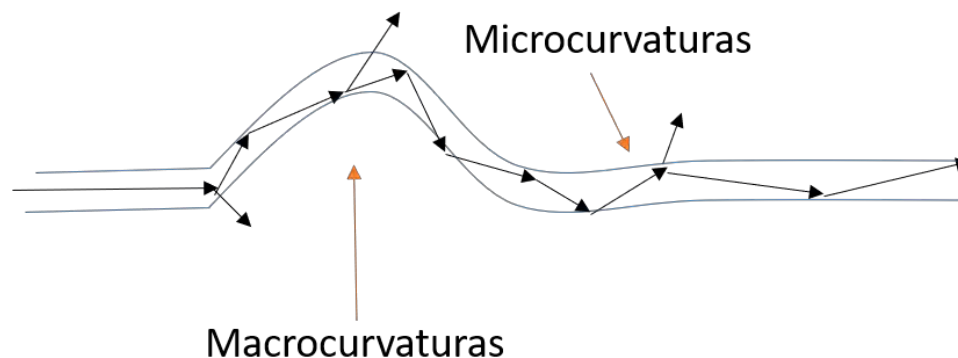


Figura 7. Pérdidas por curvaturas

Uno de los principales factores físicos que provocan las pérdidas son las curvaturas, pues conducen a la provocación de disminución de luz ya que algunos haz de luz no sufren la reflexión interna total y logran salir del núcleo hacia el revestimiento.

Estas curvaturas pueden ser clasificadas en dos: macrocurvaturas y microcurvaturas, Como puede verse en la Figura 7. Las microcurvaturas son más difíciles de detectar ya que son pequeñas curvaturas de a lo mucho unos milímetros que provocan las perdidas. Las macrocurvaturas, por otra parte, es cuando la fibra esta doblada o enrollada, o al acomodarla no queda totalmente recta.

### 2.2.7.2 Pérdidas por unión de empalme

Cuando se une una fibra óptica con otra siempre generará pérdida, ya que nunca quedarán perfectamente unidas debido a lo pequeño de sus dimensiones. Sin embargo, al hacer un empalme por fusión, se puede prevenir el que dicha pérdida no sea muy grande, al hacer correctamente el empalme por fusión se requiere que ambas partes de la fibra se encuentren muy limpias y bien colocados en la empalmadora por fusión de fibras ópticas, de esta manera se conseguirá un mejor resultado, aunque no es garantía de que sea una fusión casi perfecta. Este tipo de empalme es permanente y genera mucho menos pérdida que un empalme mecánico. Este tipo de empalme queda como en la Figura 8.

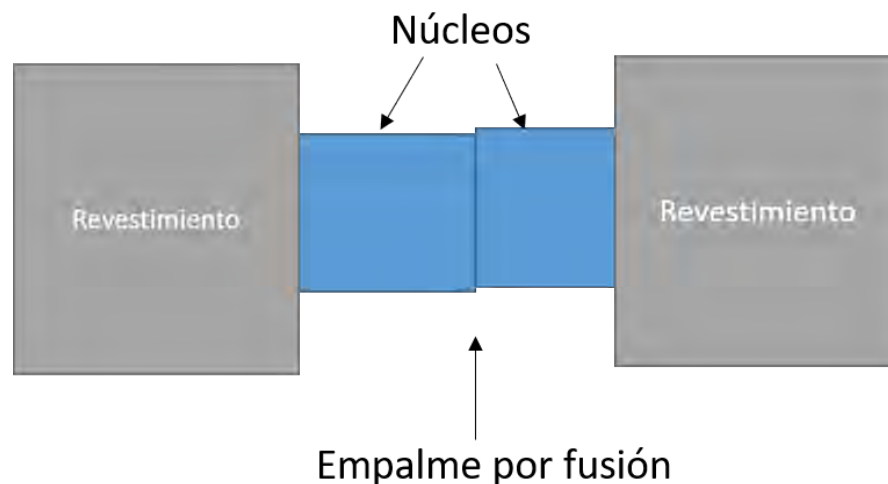


Figura 8. Empalme por fusión

Los empalmes mecánicos o manuales son empalmes que pueden ser permanentes o temporales. Estos empalmes generan mayores pérdidas que los empalmes por fusión, pues a menudo no bajan de 0.15dB de pérdida. Son rápidos de hacerse y lo único que se ocupa es un cortador que haga posible el corte recto en los extremos de las fibras ópticas que se van a unir.

Como puede observarse en la Figura 9, estos empalmes pueden hacerse de dos formas, ya sea con gel entre las fibras o no, es recomendable usar el gel pues reduce las reflexiones entre fibra y fibra.

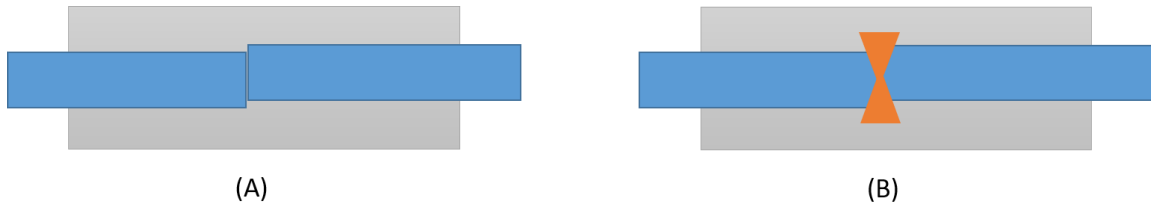


Figura 9. (A)Empalme mecánico simple, (B) Empalme mecánico con gel

### 2.2.7.3 Pérdidas por absorción

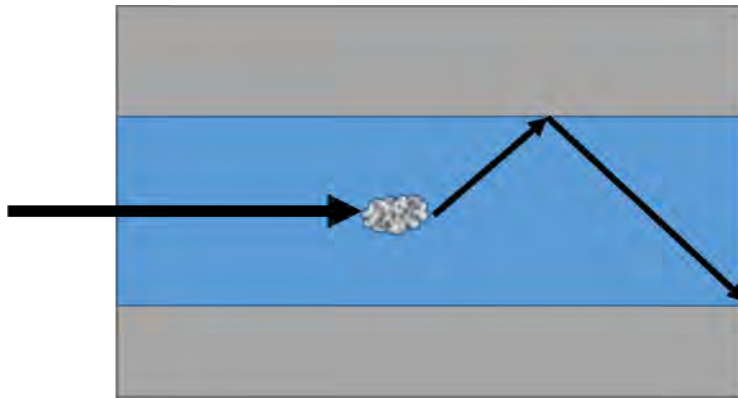


Figura 10. Pérdidas por absorción

Otro tipo de pérdidas son por absorción del material, estas pérdidas son ocasionadas por impurezas de la fibra óptica como iones metálicos, moléculas de agua, níquel variado, entre otros. Estas impurezas atrapan la luz que pasa por ellas y la transforman en calor atenuando la luz. Las mejores fibras usan vidrio muy puro para su fabricación y aun así son 99.999% puro. Y pueden generar pérdidas por absorción entre 1 y 1000 dB/km [2].

La Figura 10 muestra las pérdidas por absorción en las fibras. Como se puede observar la señal de entrada se atenúa al topar con una impureza en la fibra óptica. Lamentablemente este tipo de impurezas no se pueden erradicar por completo de las fibras ópticas.

### 2.2.7.4 Dispersión

Otro parámetro importante en las fibras ópticas es la dispersión, a grandes rasgos se entiende por dispersión a la deformación del pulso de luz enviado a través de la fibra óptica a medida que se va propagando. La dispersión puede considerarse como pérdida de una señal, pues no la debilita la señal, la vuelve borrosa.

Hay tres tipos de dispersión, la cromática, menor que la dispersión modal en fibras multimodo y aparece debido al índice de refracción, pues depende de su frecuencia de su mismo índice de refracción [1].

La dispersión modal, por otro lado, se ocasiona por las distintas velocidades de grupo en los modos de una fibra. Por lo tanto, este tipo de dispersión no puede ocurrir en fibra monomodo. Aunque puede reducirse si se utiliza una fibra de índice gradual [2].

El tercer tipo de dispersión es la polarización de modo, es cuando la velocidad de propagación de cada polarización no es la misma debido a que la fibra no sea perfectamente circular [2].

También se puede hacer diferenciación en la dispersión por ser elástica o inelástica. Un ejemplo de dispersión elástica es la dispersión de Rayleigh que se produce cuando la energía de fotón (o frecuencia de la luz) dispersa permanece sin cambios [6].

Las pérdidas de Rayleigh son similares a las pérdidas por absorción, ambos tipos de pérdidas son intrínsecas, esto quiere decir, que se deben a la fabricación de la fibra óptica y el instalador no podría hacer nada para corregirlas. A diferencia de las pérdidas por absorción, las pérdidas de Rayleigh se deben por deformidades microscópicas en la fibra óptica. Las pérdidas aumentan conforme va aumentando la distancia recorrida por los rayos de luz dentro de la fibra. Estas pérdidas pueden variar según el tipo de fibra que se esté usando ya que tienen diferentes coeficientes de atenuación total [2].

De lo contrario, cuando sucede una dispersión inelástica da lugar a efectos no lineales; que son efectos que se relacionan con el movimiento no armónico de los electrones juntos al ponerlos bajo influencias de un campo aplicado. Estos efectos serán mayormente descritos en el capítulo tres.

## 2.3 Resumen

Este capítulo trató de los puntos más importantes en la historia para lograr el surgimiento de la fibra óptica. Siendo los inicios de las comunicaciones por fibras ópticas en 1975 logrando muchos avances durante 25 años hasta el año 2000, marcando la mayor innovación en las comunicaciones.

Así como es importante la historia de la fibra óptica también lo son sus características, que, aunque no todas están descritas en este capítulo, se describen las más importantes para entender los siguientes capítulos de esta tesis. Las características aquí mencionadas están explicadas de una manera generalizada puesto que no es el tema central de esta tesis.

Dentro de las mismas características se encuentran la estructura de la fibra óptica, centrándose en las fibras ópticas de vidrio ya que esas son las más importantes, en función del

fenómeno bajo estudio. La estructura de la fibra óptica cuenta con el núcleo, el recubrimiento y el forro. Lo que diferencia al núcleo del recubrimiento es su índice de refracción. Y es posible el hacer diferencia ya que cuando se fabrican las fibras ópticas, no importando que método se use, se utilizan gases para realizarlas, mismos que son seleccionados dependiendo de la parte de la fibra óptica que se esté realizando, ya sea el núcleo o el revestimiento.

Es de suma importancia que tengan diferentes índices de refracción, y no cualquier índice de refracción, siempre debe ser mayor el índice de refracción del núcleo de la fibra que el índice de refracción del revestimiento de la fibra, pues de ese modo, cuando se envíe luz a través de la fibra óptica este provoque una reflexión total interna y no salga del núcleo la señal.

Otro de los temas tratados en este capítulo son las pérdidas de potencia. Son muy importantes pues si hay mucha pérdida en la transmisión a través de la fibra óptica puede afectar severamente la transmisión. Hay pérdidas por factores físicos como las microcurvaturas y macrocurvaturas, que, en pocas palabras, es cuando la fibra no se encuentra totalmente recta, pues hasta la más mínima curvatura puede generar que el ángulo del haz de luz que se está transmitiendo no tenga una reflexión interna total y parte de ello logre salir hacia el revestimiento, provocando una disminución de potencia. Entre otro tipo de pérdidas se encuentran las pérdidas por absorción y la dispersión en sus diferentes tipos, este tipo de pérdidas son inevitables, ya que ocurren por su fabricación y ninguna fibra está perfectamente fabricada.

El desarrollo de este capítulo está guiado para llegar a los efectos no lineales, dando paso así al capítulo número tres, donde se explica con mayor detenimiento este fenómeno.



## CAPÍTULO 3. LOS FENÓMENOS NO LINEALES EN LA FIBRA ÓPTICA

Un fenómeno no lineal, en fibras ópticas, es presentado cuando se tienen campos electromagnéticos grandes y se provoca una respuesta de dieléctricos a la luz. Un dieléctrico, a grandes rasgos, es un pésimo conductor de electricidad o calor. Algunos dirían que es un aislante, ya que, se puede decir que los materiales dieléctricos vienen siendo aislantes, pero realmente no todos los aislantes pueden ser dieléctricos, esto se debe a que si se somete un material dieléctrico a campos eléctricos externos puede generar un campo eléctrico interno, y los aislantes no tienen esta propiedad. Por lo tanto, las fibras ópticas son consideradas dieléctricos ya que están hechas de vidrio y este se considera dieléctrico. En otras palabras, un fenómeno no lineal en las fibras ópticas se genera cuando se envían rayos de luz por la fibra óptica dentro de ciertos campos electromagnéticos y hay respuesta [3].

Otra forma de identificar los fenómenos no lineales es que, son generados por movimiento que no es armónico de electrones unidos estando influenciados en campo aplicado, mismos que satisface la siguiente ecuación [2]:

$$(E.3.1) \quad P = \epsilon_0 \left( \chi^{(1)} \cdot E + \chi^{(2)} : EE + \chi^{(3)} : EEE + \dots \right)$$

Donde:

P = es el total de polarización

E = es el campo eléctrico

$\epsilon_0$  = permeabilidad del vacío

$\chi^{(j)}$  = j-esimo orden de susceptibilidad

Entonces, la ecuación anterior nos está diciendo que la polarización total que es inducida por dipolos eléctricos no es lineal en campos eléctricos y debe satisfacer la relación de la Ecuación E.3.1.

En la Ecuación E.3.1,  $\chi^{(1)}$  es contribuyente al factor P por el índice de refracción, mientras que  $\chi^{(2)}$  es donde se presentan los efectos no lineales, ya que se considera la segunda generación armónica y de sumas de las frecuencias. En particular para  $\chi^{(3)}$ , es donde se presentan efectos como el Kerr y Raman, pues es considerado el tercer armónico [2].

Los fenómenos no lineales en las fibras ópticas se generan al aumentar la potencia de la señal óptica para alcanzar distancias más largas con altas velocidades de la señal, causando la deformación de la señal, ensanchamiento de pulsos y deformaciones en amplitud [2].

Los efectos causados por estimulación son:

- Esparcimiento Raman Estimulado (SRS, Scattering Raman Stimulated)

- Esparcimiento Brillouin Estimulado (SBS, Scattering Brillouin Stimulated)

La dependencia del índice de refracción causa algunos otros efectos no lineales:

- Modulación de auto fase (SPM, Self-phase modulation)
- Modulación de fase cruzada (CPM o XPM, Cross-phase modulation)
- Mezcla de Cuatro Ondas (FWM, Four Wave Mixing)

### 3.1 SRS y SBS

Las no linealidades de la fibra óptica son provocadas en campos electromagnéticos intensos por las respuestas de cualquier dieléctrico a la luz. Como se mencionó a lo largo de este capítulo, los efectos no lineales se llevan a cabo cuando la frecuencia de la luz dispersa se desplaza hacia abajo durante la dispersión inelástica. Dos ejemplos más comunes de dispersión inelástica es la dispersión de Raman y dispersión de Brillouin [7].

Ambos fenómenos se observaron por primera vez en fibras ópticas durante la década de 1970. Estos dos fenómenos pueden entenderse como la dispersión de un fotón de energía más alta u otro de energía más baja, de tal forma que la energía aparece en forma de fonón. La principal diferencia entre los dos fenómenos ópticos es que los fonones ópticos participan en la dispersión Raman, pero en la dispersión Brillouin participan los fonones acústicos. Sin embargo, ambos procesos de dispersión producen una pérdida de potencia en la frecuencia del haz incidente [2].

Si se introducen a la fibra óptica niveles de potencia muy altos o muy bajos, los fenómenos no lineales SRS y SBS se vuelven importantes. Si estos niveles de potencia pasan un valor de potencia incidente del umbral, es decir un valor límite, la intensidad de la luz crecerá de manera exponencial, para ambos casos.

Estos efectos no lineales, son el resultado de transferir una señal de bombeo, es decir, la energía de una onda de frecuencia más alta a una de frecuencia más baja o viceversa, llamado señal de Stokes [7].

Para SBS la señal de Stokes se observa en sentido contra-propagante respecto a la señal de bombeo, es decir se obtiene al regreso de la señal. Este fenómeno puede minimizarse al limitar la máxima potencia de transmisión óptica [2].

Sin embargo, para SRS la señal de Stokes se observa en ambas direcciones. La máxima transferencia de potencia del bombeo a la señal de Stokes es cuando las dos longitudes de onda tienen una diferencia cercana a 110nm, es cuando la máxima transferencia de potencia en SRS, para fibras ópticas de silicio. Entonces, para SRS, es un efecto interferente entre dos longitudes de onda con espaciamentos cercanos a 110nm. En el efecto SRS se puede generar ruido por

emisión espontánea y esto puede afectar el desempeño de los enlaces ópticos. Si la señal de bombeo es continua el efecto SRS se puede emplear como amplificadores [1].

La Tabla 2 muestra la comparación entre los dos fenómenos no lineales presentados causados por estimulación.

Tabla 2. Tabla comparativa entre SBS y SRS

	SBS	SRS
Nombre	Scaterring Brillouin Stimulated	Scaterring Ramman Stimulated
Descripción general	Puede entenderse como la dispersión de un fotón de energía más alta u otro de energía más baja, de tal forma que la energía aparece en forma de fonón acústico.	Se entiende como la dispersión de un fotón de energía más alta u otro de energía más baja, de tal forma que la energía aparece en forma de fonón óptico.
Lugar de observación	Señal de regreso.	Señal de salida y regreso.
Efecto en la señal	Es limitante en cuanto a la luz que se podría transmitir por la fibra, puede provocar la diafonía.	Puede generar pérdidas en la señal transmitida, en cuanto a la dispersión y potencia de la señal.
Causa	Interacción con fotón-fonones acústicos.	Interacción con fotón-fonones ópticos.
Minimización del efecto	Usando potencias que no pasen el umbral.	Usando potencias que no pasen el umbral.

Como se puede observar en la Tabla 2 la diferencia entre SBS y SRS más notable es que los causan diferentes tipos de fotón-fonones. Los fotones que son partículas que transportan la luz u otra radiación electromagnética, aunque por lo general no interactúan con todo si tiene diferentes longitudes de onda, los fonones por otra parte pueden interactuar con diferentes longitudes de onda y mezclarse cuando chocan entre sí, produciendo una longitud de onda diferente [8].

La manera de contrarrestar estos dos fenómenos no lineales es no pasar la potencia umbral de esta forma difícilmente aparecerían ambos fenómenos. Sin embargo, así como pueden intentar contrarrestarse estos fenómenos, también pueden ser de utilidad para hacer láseres o amplificadores a partir de estos dos fenómenos no lineales. El fenómeno SRS se explicará en capítulo 4 con más detenimiento.

### 3.2 SPM, XPM y FWM

El efecto Kerr, llamado así por John Kerr, es un efecto electro-óptico que genera la dependencia no lineal causada por el índice de refracción respecto a la intensidad de la onda incidente provocando efectos como SPM, XPM y FWM, que se consideran no lineales. La Tabla 3 muestra la comparación entre los tres fenómenos no lineales presentados causados por el índice de refracción [9].

Tabla 3. Tabla comparativa entre SPM, XPM y FWM

	SPM	XPM	FWM
Nombre	Self-phase modulation	Cross-phase modulation	Four Wave Mixing
Descripción general	SPM se encarga del ensanchamiento espectral por pulsos ultracortos y también es responsable por la formación de solitones ópticos. Aparece por la saturación de ganancia en el índice de refracción por las variaciones de densidad del portador.	XPM se define como el desplazamiento de fase no lineal de un campo óptico inducido por otro campo óptico con una diferencia de longitud de onda, de dirección o de estado de polarización.	Es producida al propagarse y mezclarse dos o más señales en la fibra, esto puede crear nuevos componentes en la señal que es transmitida por la fibra.
Efecto en la señal	Se ensancha el pulso.	Hay cambio en la amplitud e interferencia.	Degradación de señal.
Causa	Efecto Kerr	Efecto Kerr	Interacción con los fotones
Minimización del efecto	Aumento en longitud de onda de señal.	Aumento de la separación de canal.	Disminuir la intensidad de la señal.

El fenómeno no lineal SPM surge, como se ha mencionado antes, porque el índice de refracción tiene componentes que dependen directamente de la intensidad. Ya que es proporcional la intensidad del pulso a el desplazamiento de fase por el índice de refracción no lineal. Es por esto por lo que las distintas partes de un pulso sufren distintas direcciones de desplazamientos de fase produciendo así, la variación en la frecuencia con el tiempo del pulso. La fase de la señal es también modulada por su propia potencia, lo que quiere decir que este fenómeno puede estar ocurriendo en sistemas de múltiples canales simultáneamente. Sin embargo, SPM es considerado un fenómeno no lineal limitante del desempeño de los sistemas ópticos para alta velocidad [1].

Por otra parte, el fenómeno XMP surge al polarizar las señales distintas unas de otras transmitiéndose al mismo tiempo. Este depende también del índice de refracción no lineal, que a su vez es dependiente de toda la intensidad de la señal, puesto que aumenta la variación frecuencial al mandar una señal con polarización determinada va a provocar cambios de fase en la otra señal con polarización ortogonal [1].

FWM se genera al propagar varias señales con frecuencias  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ , a través una misma fibra óptica. Este fenómeno se produce en el momento que tres ondas a frecuencias distintas y con potencias distintas interactúan para formando una onda nueva originándose por la intensidad de la señal y la dependencia al índice de refracción, al ser la cuarta de las ondas, es por lo que se le da el nombre a dicho efecto. La esta relación provocada hace que aparezcan nuevos pulsos formando nuevas frecuencias. Es por esto, que se dice que también está involucrado el efecto Kerr en este fenómeno [1].

### 3.3 Importancia de los Efectos No Lineales

Para poder observar que tan importantes son estos efectos no lineales se debe dar mérito al producto  $IL_{\text{eff}}$ , donde  $I$  es la intensidad óptica y  $L_{\text{eff}}$  es la longitud efectiva de la región de interacción. Si la luz se dirigiera a un punto de radio de  $w_0$ , entonces se obtendría que  $I = P/(\pi w_0^2)$ , para  $P$  como la potencia óptica incidente. Se puede observar que se puede aumentar el enfoque de la luz para reducir  $w_0$  aumentando  $I$ . Pero ya que la longitud de la región focal disminuye con un enfoque más preciso haciendo menor  $L_{\text{eff}}$  [2].

Considerando un haz gaussiano ( $L_{\text{eff}} \sim \pi w_0^2 / \lambda$ ) haciendo dependencia del tamaño de  $w_0$ , quedaría de la siguiente forma [2]:

$$(E.3.2) \quad (IL_{\text{eff}})_{\text{bulk}} = \left( \frac{P}{\pi w_0^2} \right) \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = \frac{P}{\lambda}$$

Para fibras monomodo el tamaño de  $w_0$  este dado por el tamaño del radio del núcleo y debido a la guía de onda dieléctrica, este mismo tamaño de luz guiada se puede mantener a lo largo de la fibra  $L$ . Para este caso, la interacción de Lewis indica que la longitud de interacción está limitada por la pérdida de la fibra  $\alpha$ . Haciendo uso de  $I(z) = I_0 \exp(-\alpha z)$  y teniendo en cuenta que  $I_0 = P/(\pi w_0^2)$ , sabiendo que  $P$  es la potencia óptica acoplada a la fibra, la ecuación quedaría [2]:

$$(E.3.3) \quad (IL_{\text{eff}})_{\text{fibra}} = \int_0^L I(z) \exp(-\alpha z) dz = \left( \frac{P}{\pi w_0^2} \right) [1 - \exp(-\alpha L)]$$

Comparando las últimas dos ecuaciones se puede determinar que, en fibras, de un largo suficiente, la eficiencia de los procesos no lineales puede mejorar para las fibras ópticas al poner atención en el factor:

$$(E.3.4) \quad \frac{(I_{\text{eff}})_{\text{fibra}}}{(I_{\text{eff}})_{\text{bulk}}} = \frac{\lambda}{\pi w_0^2 \alpha}$$

Es mucha la mejora en la eficiencia de procesos no lineales para las fibras de sílice usándolas como un medio no lineal adecuado para la observación de los mismos efectos no lineales en bajos niveles de potencia. Hay una cierta lentitud de las fibras de sílice como un problema en fibras cortas, por lo que es posible la fabricación de fibras con materiales no lineales para los que son más grandes que la de sílice. Se han hecho pruebas con fibras de silicato de plomo que presentan valores mayores. Este tipo de fibra está en proceso de experimentación, para hacer dispositivos como amplificadores, láseres, rejillas, etc [8].

### 3.4 Resumen

A lo largo de este capítulo se hace comparación entre 5 efectos no lineales, separados por sus diversas características, esto permite tener un punto de comparación entre los cinco y poder apreciar sus cualidades y diferencias. Si bien estas diferencias no significan que uno sea mejor que otro, pues cada uno de ellos tienen diversos usos hoy en día.

Los fenómenos no lineales se pueden separar en dos tipos, unos referentes a la estimulación y otros causados por el índice de refracción.

Los fenómenos no lineales SBS y SRS son generados por estimulación. Ambos pueden ser generados por la dispersión de un fotón de energía más alta u otra energía más baja, de forma que la energía aparece como un fonón. Estos efectos son logrados si se le introduce a la fibra óptica potencias muy bajas (SBS), o potencias muy altas (SRS), generando los Stokes en la señal.

Estas son dos diferencias en relación con SRS y SBS:

- SBS ocurre solo en la dirección de regreso mientras SRS se puede encontrar en ambas direcciones.
- La frecuencia de la luz dispersa se desplaza aproximadamente a 10GHz para SBS, sin embargo, para SRS se desplaza a 13THz. Este cambio también es llamado desplazamiento de Stokes.

Las mediciones que se han realizado para SRS y SBS en fibras de sílice se observa que los valores son menores en dos órdenes de magnitud o más en comparación con otros efectos no lineales.

Por otro lado, los fenómenos dependientes del índice de refracción, SPM, XPM y FWM. Son muy similares ya que conllevan al efecto Kerr. De manera generalizada, lo que diferencia uno de otro a estos efectos, es que uno depende del desplazamiento de la fase de la señal debido a

la intensidad del pulso (SPM), otro de la polarización de distintas señales en un mismo canal (XPM) y el otro de que se cree un canal a partir de otros canales (FWM).

# CAPÍTULO 4. EL ESPARCIMIENTO RAMAN ESTIMULADO EN LA FIBRA ÓPTICA

Este capítulo trata exclusivamente del efecto no lineal SRS, de sus características y cualidades que lo hacen un fenómeno interesante. Se describe sus ventajas y desventajas para presentar un panorama más completo de lo que es el Esparcimiento Raman Estimulado. De igual forma se exponen algunos usos y formas de implementación de este fenómeno. Aunque ya hay una descripción breve de este fenómeno en el capítulo 3, este capítulo se intenta ir más a fondo en la información.

Primeramente, se expondrá como obtener este efecto, junto con algunas cualidades importantes para su desarrollo. De igual forma y de mucha importancia, se abordarán las aplicaciones SRS enfocado en láseres y amplificadores.

## 4.1 Conceptos Básicos

Como se ha mencionado en el capítulo anterior el Esparcimiento Raman Estimulado (SRS) es un proceso no lineal que puede convertir fibras ópticas en amplificadores de banda ancha y láseres sintonizables. De igual forma, puede limitar drásticamente a los sistemas de onda de luz multicanal al transferir energía de uno de los canales a los canales vecinos, esto en cuanto a su rendimiento.

### 4.1.1 Stokes y anti-Stokes

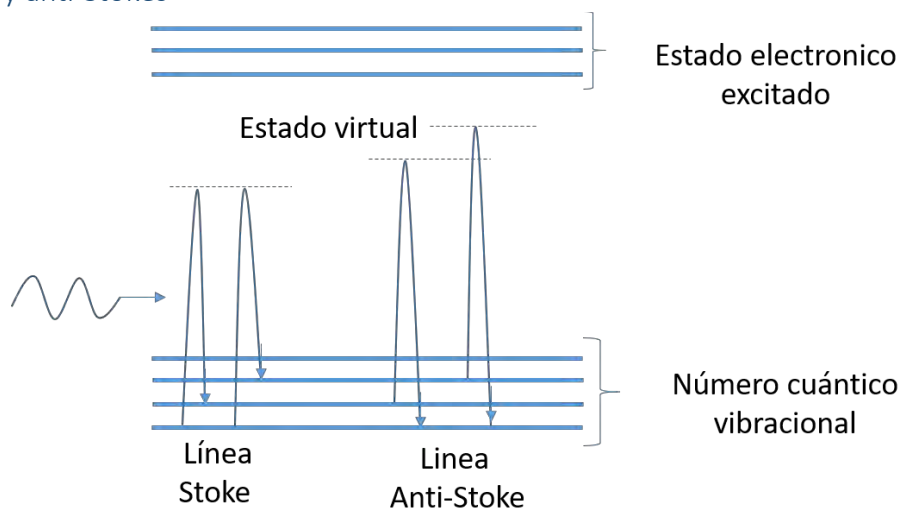


Figura 11. Diagrama de esparcimiento Raman línea Stokes y Anti-Stokes



El efecto Raman es provocado inicialmente por la luz que incide en la fibra con electrones de moléculas iluminadas. Sin embargo, la luz incidente debe tener suficiente potencia para poder llevar a la excitación de la molécula a niveles vibracionales mayores de energía, dando como resultado la estimulación Raman. Resumiendo lo anterior, la estimulación Raman es el resultado de la excitación de una molécula suficientemente (o cambiar su estado vibracional) para que cambie a mayor nivel electrónico al aumentar la potencia de la luz incidente sin llegar al estado electrónico excitado, tal como se muestra en la Figura 11 [3].

En la Figura 11 muestra el origen del esparcimiento Raman. Esta figura muestra un diagrama del funcionamiento de los Stokes y Anti-Stokes. En este diagrama se alcanza a apreciar como una molécula puede alcanzar un nivel de energía más alto, pero no podrá alcanzar el estado electrónico excitado.

Esparcimiento Raman es el nombre que se le da a la luz que se dispersa de forma inelástica. De manera que hay dos tipos de resultados del esparcimiento Raman, el llamado Stokes que es cuando la luz dispersa tiene menos energía que la luz que incide y el efecto Anti-Stokes que es cuando la luz dispersa tiene más energía que la luz incidente puesto que tiene mayor frecuencia que la luz incidente [3].

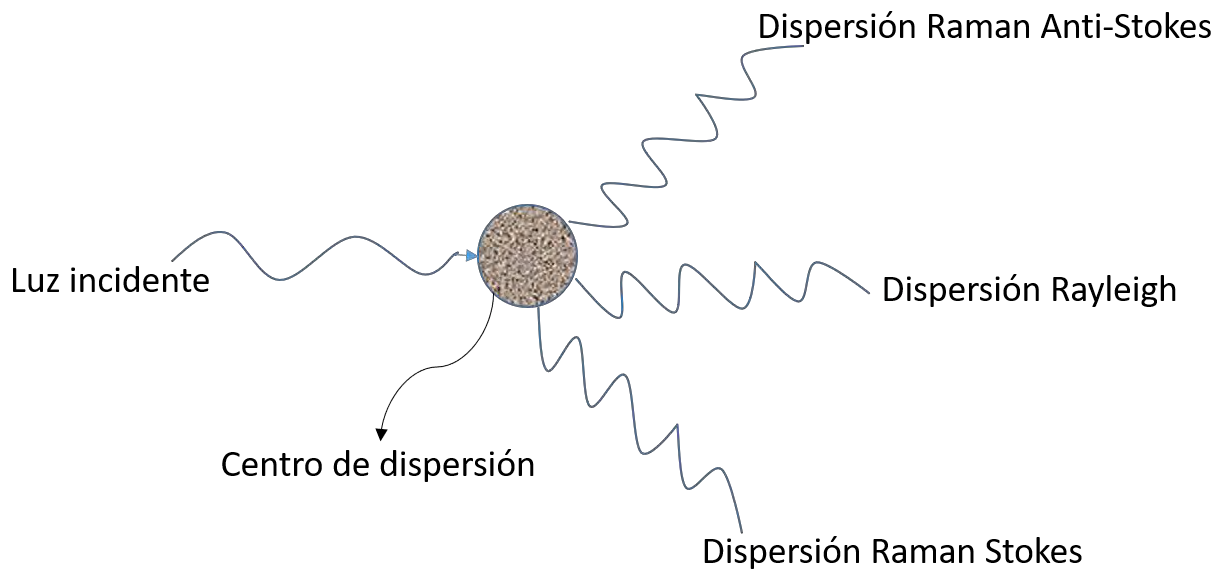


Figura 12. Representación de tres tipos de luz siendo dispersada

Por otro lado, la dispersión Rayleigh es la más usual puesto que los objetos son visibles por este efecto. Para este efecto es de conocimiento que cada rayo de luz se dispersa según la proporcionalidad inversa de la cuarta potencia de su respectiva longitud de onda. Por ejemplo: la luz del sol está conformado por distintas longitudes de onda, sin embargo, unas se dispersan más que otras, es por esto por lo que se mira el cielo azul, porque la luz azul se dispersa más que la roja, es por esto que cuando se observa un atardecer o un amanecer, se ve en tonos rojizos porque miramos la luz que no se ha dispersado mucho. La intensidad dependerá de la

posición de la cual se observe el fenómeno. Comparado con Rayleigh, el esparcimiento Raman no es tan común en un día habitual. Pero, es de suma importancia para las personas interesadas en las vibraciones y rotaciones de las moléculas. Para la creación de Raman es necesario dos fotones con distintas energías, ya que hacen presente cambios en el estado, ya sea rotacional o vibracional de la molécula. Estos dos estados están causados al juntar los fotones. Por lo tanto, si se analiza el espectro Raman a nivel molecular nos podemos dar cuenta de las propiedades de las mismas moléculas [6].

Hay varios factores que contribuyen a la creación de Stokes, tales como: la ganancia de la fibra, el área efectiva de la fibra, la potencia de entrada, longitud de la fibra, etc.

#### 4.1.2 Ganancia en el espectro Raman

La ganancia es una característica que tiene la fibra, para cada fibra es diferente, esta característica es uno de los factores por los cuales hay crecimiento de Stokes.

La manera más fácil de comprender la ganancia en Raman es mediante el siguiente ejemplo. Tomando la siguiente ecuación, dando un enfoque simple bajo condiciones de onda continua, para encontrar el crecimiento inicial de la onda de Stokes [2]:

$$(E.4.1) \quad \frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s$$

Dónde:

$dI_s/dz$  se refiere a la derivada de la onda Stokes

$g_R$  se refiere al coeficiente de ganancia Raman, relacionada con la no linealidad

$I_p$  se refiere a la intensidad de la bomba

$I_s$  se refiere a la intensidad de Stokes

La ganancia Raman  $g_R(\Omega)$ , donde  $\Omega$  es la diferencia de frecuencias entre las ondas de Stokes y la bomba, es la cantidad que nos importa ya que esta describe SRS. Sin embargo,  $g_R$  depende de la composición de los materiales en que está compuesto el núcleo de la fibra, lo que por supuesto puede variar con el uso de los dopantes diferentes. En la Figura 13, se toma como ejemplo una fibra de sílice fundido con un desplazamiento en la frecuencia siendo  $\lambda_p = 1 \mu m$  la longitud de onda de bombeo utilizada. Sin embargo, para longitudes de onda de bombeo se podría obtener  $g_R$  al usar la dependencia inversa de  $g_R$  en  $\lambda_p$  [2].

Podemos observar, en la Figura 13, cómo se desarrolla el fenómeno no lineal SRS, considerando  $\omega_p$  como la frecuencia óptica a la que se propaga dentro de una fibra, teniendo en cuenta un haz de bomba de una onda continua (CW). Si el haz de sondeo a una frecuencia

$\omega_s$  coincide con la bomba de entrada de la fibra, se amplificará debido a la ganancia Raman, siempre y cuando la diferencia de frecuencia dado por [2]:

$$(E.4.2) \quad \Omega = \omega_p - \omega_s$$

esté dentro del ancho de banda del espectro de ganancia Raman que se puede ver en la Figura 13. Si solo el haz de la bomba incide en la entrada de fibra, la dispersión de Raman espontánea actúa como una sonda y se amplificará con la propagación. Ya que la dispersión espontánea Raman va a generar fotones dentro del ancho de banda del espectro de ganancia Raman, los componentes de frecuencia se amplifican. Sin embargo, se acumula más rápido el componente de frecuencia para el cual  $g_R$  es máximo.

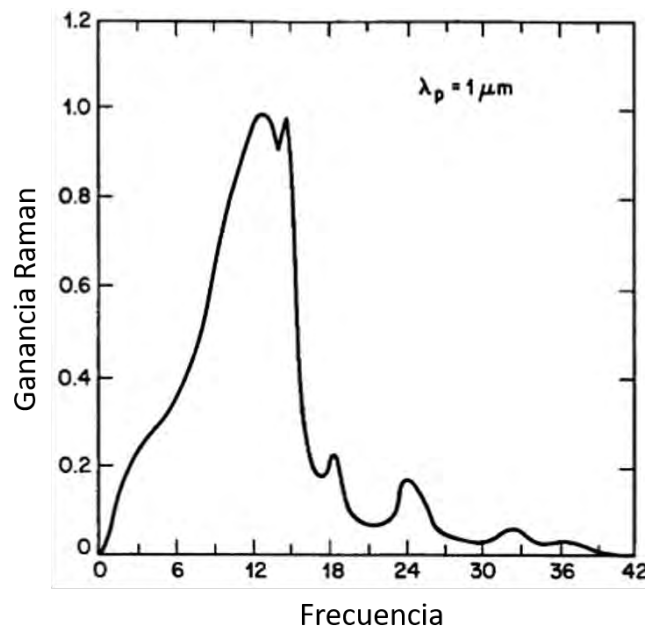


Figura 13. Ejemplo de ganancia Raman para una fibra de sílice con  $\lambda_p = 1 \mu m$

Pues cuando la potencia de la bomba excede un valor umbral, el componente se va construyendo casi exponencialmente. Teniendo como resultado el efecto SRS que conduce a una generación de la onda Stokes, teniendo una frecuencia determinada por el pico de la ganancia de Raman. Este cambio de frecuencia está denominado como cambio de Raman o el cambio de Stokes [2].

#### 4.1.3 Umbral de Raman

Se debe de considerar la interacción no lineal entre la bomba y las ondas de Stokes para poder encontrar el umbral Raman. Para CW (onda continua), la interacción está dada por las siguientes ecuaciones [2]:

$$(E.4.3) \quad \frac{dI_s}{dz} = g_R I_p I_s - \alpha_s I_s$$

$$(E.4.4) \quad \frac{dI_p}{dz} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} g_R I_p I_s - \alpha_p I_p$$

Donde:

$\alpha_s$  = pérdidas de fibra en el Stokes

$\alpha_p$  = frecuencias de la bomba

Estas ecuaciones pueden derivarse usando las ecuaciones de Maxwell y al poner los diversos factores existentes como las pérdidas en la bomba, el agotamiento del mismo etc. Sin embargo, debido a que no es el tema central de este capítulo solo se presenta el resultado para seguir con el ejemplo de la Figura 13, quedando [9]:

$$(E.4.5) \quad \frac{g_R P_0^{cr} L_{eff}}{A_{eff}} \approx 16$$

Donde:

$L_{eff}$  = es la longitud de interacción efectiva

$A_{eff}$  = es el área efectiva del núcleo

Para SRS retrogrado se podría llevar un análisis algo similar al anterior. Ya que la condición del umbral para este caso está dada por la Ecuación E.4.5, sin embargo, el factor numérico 16 se cambia por 20. Generalmente el SRS no se observa hacia atrás en la fibra óptica porque el umbral de SRS directo se alcanza primero a una potencia de bomba dada. La ganancia de Raman se puede usar para amplificar una señal hacia atrás de propagación.

Debe de tenerse en cuenta que la derivación de la Ecuación E.4.5 hace suposición que la polarización de la bomba y las ondas de Stokes se mantienen a lo largo de la fibra. Debido a que los niveles de potencia dentro de una fibra óptica generalmente son inferiores a 10mW, es probable que SRS no se producirá en los sistemas de comunicación óptica de un solo canal. Sin embargo, con el uso de amplificadores ópticos, la potencia puede aproximarse a los 100mW para algunas aplicaciones, pero sigue estando por debajo del valor crítico [2].

Realmente se puede notar que la condición de umbral está muy precisa. Puesto que una vez que se alcanza el umbral Raman la potencia es transferida de la bomba al Stokes. Como puede observarse la teoría nos sirve en este caso para predecir la transferencia completa de la bomba al Stokes, exceptuando las pérdidas que podría tener la fibra. En el ejemplo, que se usó el Stokes sirve como una bomba para generar una onda de Stokes del siguiente orden, solo si su potencia llega a ser lo suficientemente grande, que es lo que ocurre en la parte experimental de

esta tesis descrita en el capítulo 6. Puesto que este proceso de SRS puede generar varias ondas de Stokes los cuales dependen de la potencia de la bomba de entrada.

Como esta tesis es experimental, la manera de encontrar el umbral del Stokes, es aumentando la potencia de entrada hasta que la potencia del residual se empareje con la potencia del Stokes. Entonces, al llegar a este punto, la potencia de entrada será mi potencia umbral del Stokes.

## 4.2 Aplicaciones de Raman

Como se ha escrito a lo largo de esta tesis que el fenómeno no lineal SRS puede presentarse como una gran desventaja como limitante o una gran ventaja dependiendo de los usos que se les den a las fibras ópticas. En esta sección se expondrán dos funciones en favor de SRS. Estas dos ventajas son sus usos como láser y como amplificador.

### 4.2.1 Uso como láser

Como primer uso, expuesto en esta tesis, SRS en las fibras ópticas puede ser empleado como láseres. Estos láseres pueden hacerse sintonizar en un gran rango de frecuencias (10THz) [10].

En las primeras demostraciones de un láser Raman, en la década de 1970, la potencia umbral fue mayor ya que se usó una fibra corta, su umbral fue de alrededor de los 500 W. Sin embargo, para los experimentos que se siguieron haciendo, el umbral fue disminuyendo hasta 1W usando fibras ópticas más largas. Estas características permitieron; el CW de un láser Raman en longitudes de onda en el rango de 0.50 a 0.53 $\mu$ m usando un láser de iones de argón como la bomba [2].

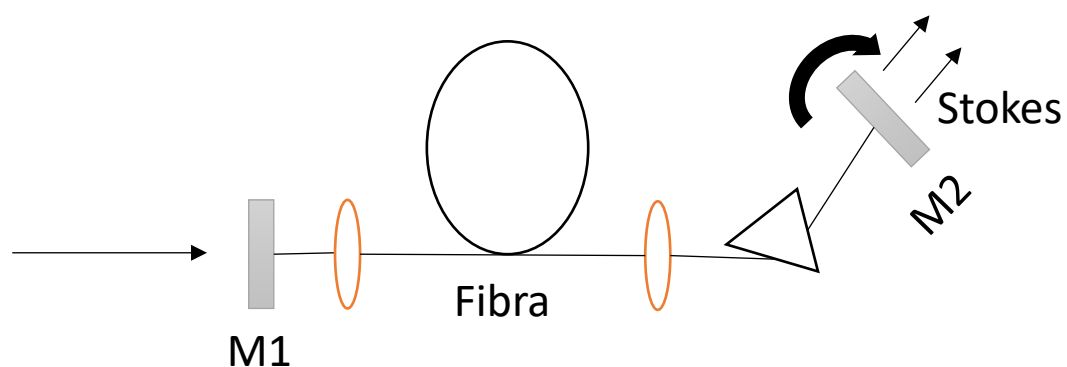


Figura 14. Esquema básico de un láser Raman

Un ejemplo de esquema simple de láser Raman es el de la Figura 14. Esto es posible al colocar una pieza de fibra monomodo dentro de una cavidad Fabry-Prot formada por dos

espejos parcialmente reflectantes, llamémoslos M1 y M2. Dicha cavidad para proporcionar retroalimentación selectiva de longitud de onda, esto para la luz de los Stokes generada dentro de la misma fibra a través de Raman. Un funcionamiento entre cavidades va a permitir la sintonización de la longitud de onda del láser dispersando así varias longitudes de onda de Stokes espacialmente, estas pueden seleccionarse al girar el espejo M2. Para este caso, el umbral del láser corresponderá a la potencia de la bomba a la cual la amplificación de Raman es lo suficiente grande como para equilibrar las pérdidas de cavidad durante un viaje de ida y vuelta [2].

Como se ha dicho anteriormente, los Stokes de orden superior en Raman ocurren al introducir potencias de bombeo grandes. Después de varios experimentos, se consideró el uso de un prisma intracavitario. Las longitudes de onda están dispersas por el prisma intracavitario para el uso del láser. De manera que, al agregar espejos separados para cada haz de Stokes, un láser Raman de este tipo se puede operar en una variedad de longitudes de onda a la misma vez, solamente que cada una de las longitudes de onda se puede sintonizar independientemente, únicamente girando un espejo de cavidad. En algunos experimentos, se han usado una configuración de cavidad en forma de anillo para generar cinco ordenes de bandas de Stokes haciéndolas sintonizables. Los láseres Raman se han operado en la región infrarroja mayormente, esta región se encuentra ente  $1.1\mu\text{m}$  a  $1.6\mu\text{m}$ , ya que es una región útil para las comunicaciones por fibra óptica [10].

Al introducir las rejillas de Bragg se reemplazaron los espejos de cavidad. Sin embargo, los acopiadores de fibra fusionamos también son utilizables para este propósito.

#### 4.2.2 Uso como amplificador

También es posible crear un amplificador a partir de los láseres de Raman, es decir, si se acomoda tres pares de rejillas o acopiadores de fibra formando tres cavidades para tres láseres Raman operando a longitudes de onda de  $1.117\mu\text{m}$ ,  $1.175\mu\text{m}$  y  $1.24\mu\text{m}$ , que corresponden al primer, segundo y tercer orden de la línea de Stokes con una bomba de  $1.06\mu\text{m}$ . El resultado es un láser Raman de  $1.24\mu\text{m}$  que es muy útil para amplificar señales de  $1.31\mu\text{m}$ . Este mismo diseño o enfoque se puede hacer para que el láser resultante sea de  $1.48\mu\text{m}$  usando fibra de fosfosilicato, ya que está fibra proporciona un cambio de Stokes de casi 40 THz y podría convertir una bomba de  $1.06\mu\text{m}$  a una radicación de  $1.48\mu\text{m}$  a través de la línea de Stokes de segundo orden [1].

Como se ha mencionado anteriormente, las fibras ópticas pueden amplificar una señal débil cuando se lanza junto con la señal débil una onda de bombeo fuerte de manera que su diferencia de frecuencia se encuentre dentro del ancho de banda del espectro de ganancia Raman. Ya que SRS es el mecanismo que se puede utilizar para la amplificación, este tipo de mecanismos se llaman amplificadores de fibra Raman. Realmente estos amplificadores se

hicieron alrededor de 1976, sin embargo, se desarrollaron aún más en la década de 1980 para aplicaciones con fibra óptica en los sistemas de comunicaciones. La configuración experimental para amplificadores es muy parecida a la de un láser, como el de la Figura 14, solo cambian los espejos ya que no los lleva. Para una configuración de bombeo directo, la bomba se propaga con la señal hacia una dirección mientras que ambos se contra producen en la configuración de bombeo hacia atrás [11].

La ganancia que proporcionan los amplificadores Raman bajo operación CW o cuasi-CW puede obtenerse con las Ecuaciones E.4.3 y la Ecuación E.4.4. Para este caso se puede ignorar el agotamiento si la intensidad de la señal  $I_s(z)$  es menor a la de la bomba [2].

Una característica que llama la atención de los amplificadores Raman está relacionada con su ancho de banda de 5THz. Se puede utilizar para varios canales a la vez en un sistema de onda de luz multiplexada por WDM o división de longitud de onda, demostrado en un experimento de 1987. En este experimento se amplificaron simultáneamente señales de tres láseres semiconductores de retroalimentación distribuida que operaban en el rango  $1.57\mu\text{m}$  a  $1.58\mu\text{m}$  usando una bomba de  $1.47\mu\text{m}$ . La ganancia de 5dB se obtiene con una potencia de bombeo de 60mW [3].

Una de las principales desventajas de los amplificadores Raman, desde un punto de vista de las aplicaciones de sistemas de comunicaciones, es que es necesario potencias muy altas en los láseres a utilizar para bombear. Los experimentos que se han hecho cerca de  $1.55\mu\text{m}$  generalmente usan láseres de centro de color sintonizable con una bomba, pero estos láseres son demasiado voluminosos para aplicaciones de comunicación [3].

Desde 1995 han llamado la atención los amplificadores Raman en la región de  $1.3\mu\text{m}$ . Aquí es donde entra el ejemplo de uso de láseres SRS en cascada para hacer amplificadores usando las rejillas de Bragg. La misma idea fue usada para obtener ganancias de 39 dB a  $1.3\mu\text{m}$  usando acopladores WDM en lugar de redes de fibra [11].

Otra aplicación de los amplificadores Raman, es usarlos para amplificar el ancho de banda de los sistemas WDM operando a una longitud de onda en la región de  $1.55\mu\text{m}$ . Los amplificadores de fibra dopados con erbio son usados en este régimen de longitud de onda y tienen un ancho de banda menor a 35nm. Pero, se necesita una técnica de reducción de ganancia para poder usar todo el ancho de banda de 35nm. Los sistemas WDM masivos, que son de 80 o más canales, requieren amplificadores ópticos capaces de tener una ganancia uniforme entre 70 a 80nm. Por lo tanto, se desarrollaron amplificadores híbridos que combinan el dopaje de erbio con la ganancia Raman. Tomando en cuenta esta idea, se hizo un ancho de banda de casi 80nm combinando un solo amplificador con fibra dopada de erbio y otros dos amplificadores Raman, bombeados a estas tres longitudes de onda 1471, 1495 y 1503 nm usando cuatro módulos de bomba, cada módulo lanza más de 150mW de potencia en la fibra. En las pruebas el láser de bomba para los dopantes de erbio lanzó 62mW de potencia a

1465nm. La ganancia combinada se aproxima a los 30dB y es casi uniforme entre 1.53 a 1.61 $\mu$ m de rango [1 y 2].

### 4.3 Resumen

En este capítulo se concentra en el esparcimiento Raman estimulado o SRS, sus características, ventajas y desventajas.

El proceso del efecto Raman se describe como el cambio de una pequeña fracción de potencia de un campo óptico a otro, cuya potencia se desplaza hacia abajo en una cantidad determinada por los modos de vibración del medio, lo anterior en cualquier medio molecular.

Sin embargo, cuántica y mecánicamente, es la dispersión de un fotón por una de las moléculas a un fotón de baja frecuencia, mientras que la molécula hace la transición a un estado vibratorio de energía superior. La luz incidente actúa como una bomba para que así generar la radiación que se desplaza en frecuencia y a esto se le llama onda Stokes. Desde 1962 se ha observado el fenómeno Raman al tener campos de bombeo intensos en el que se genera la onda de Stokes, que crece muy rápido en el medio de manera que la mayor parte de la energía de la bomba se transfiere a ella, y al ser este un fenómeno no lineal se ha estudiado para así combatirlo para no tenerlo o explotarlo para usarlo según sea el caso o la aplicación que se requiera darle.

Hay muchas variantes para la generación de Stokes, algunas de ellas son: el área efectiva de la fibra, la ganancia, la potencia de entrada, longitud de la fibra, etc.

El umbral puede ser calculado teóricamente, sin embargo, se puede saber cuál es la potencia de umbral al observar cuando el residual de bombeo y el primer Stokes se encuentren a la misma potencia, entonces la potencia de entrada será igual a la potencia de umbral del Stokes.

En este capítulo se mencionan dos aplicaciones de SRS pues puede ser usado como laser y como amplificador. La configuración de ambas aplicaciones es muy similar y se ha experimentado para hacer mejoras en el diseño y obtener mejores resultados al utilizar SRS en cualquiera de estas aplicaciones.



## CAPÍTULO 5. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

### 5.1 Diagrama Experimental

Como se ha mencionado en el capítulo anterior el Esparcimiento Raman Estimulado en la fibra óptica solo se logra mandando una señal de alta potencia. Por lo tanto, para la realización de este proyecto se han utilizado los siguientes componentes y equipos de laboratorio:

- Láser de 10W
- Analizador de Espectros Ópticos (Optical Spectrum Analyzer - OSA)
- 25Km de fibra óptica SMF-28
- Microposicionador de tres ejes

El diagrama de la Figura 15 muestra el arreglo experimental que se propuso para la recreación del fenómeno.

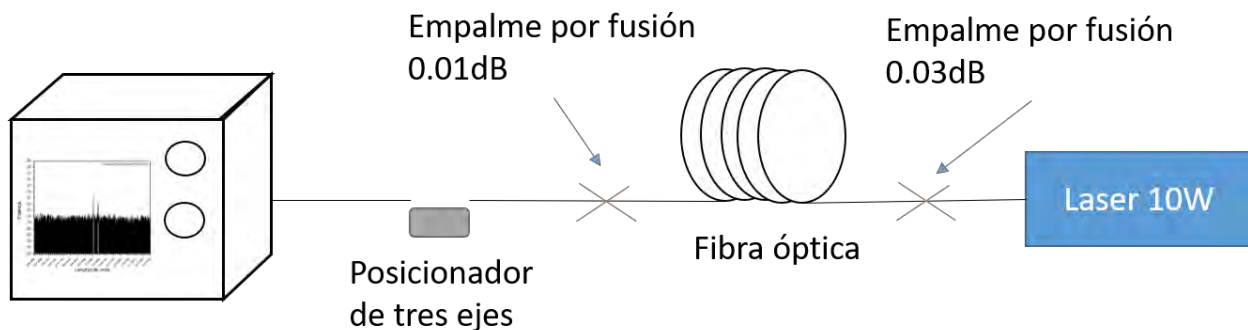


Figura 15. Diagrama experimental

Como se puede observar a grandes rasgos, el láser de 10 W mandará señal por la fibra de 25 Km, la cual estará colocada en un acoplador, mismo que se sujetará al posicionador de tres ejes, en el cual también estará el acoplador con una sección de fibra que conectará al OSA.

En este diagrama experimental se necesita un posicionador de tres ejes debido a que la potencia que se enviará por la fibra es mucho mayor a la que soporta el OSA, debe haber una separación para generar pérdidas de potencia, y de esta forma no dañar al OSA. Sin embargo, el OSA registrará la potencia con la que se muestra el Stokes, ya que cuando se vean las gráficas, los factores serán potencia en el eje “y” en dBm y longitud de onda en el eje “x” en nm.

Para poder realizar las conexiones de una fibra a otra, se utilizará la fusionadora de fibras ópticas, junto con las herramientas necesarias para hacer las mejores fusiones posibles, es decir, las que presenten menor pérdida.

La Figura 15 muestra las pérdidas que se generaron debido a los empalmes por fusión (la técnica de fusión de fibras se explica en la sección 5.4). Como se puede notar solo fue necesario realizar dos empalmes, generando una pérdida total de 0.04dB. La fibra que se usó del posicionador al OSA ya tenía los acopladores para la interconexión entre ambos dispositivos.



*Figura 16. Evidencia de equipo instalado en laboratorio*

La Figura 16 muestra como quedó implementado el diagrama experimental en el laboratorio de Óptica de la Universidad Autónoma Del Carmen, Campeche.

## 5.2 Datos Teóricos

Los siguientes datos teóricos son los que se deben de tomar en cuenta para realizar las pruebas. Ya que al tener conocimiento de los mismos se podrá saber lo que se está buscando al ver la señal en el OSA y de esta forma lograr una buena caracterización.

### 5.2.1 Láser



Figura 17. Láser a 10W usado para SRS

La Figura 17 muestra el frente del láser a utilizar en el proyecto, este laser puede variar su potencia de 0 a 10W el cual servirá como la potencia de bombeo a una longitud de onda de 1064nm, por lo cual se encuentra en el espectro infrarrojo (invisible).

### 5.2.2 OSA



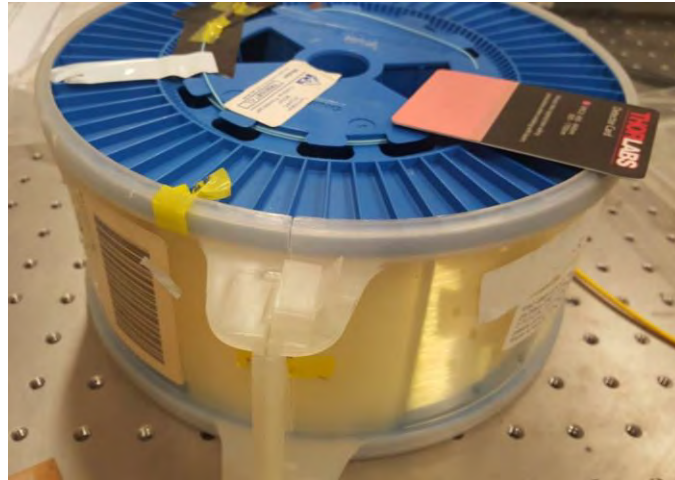
Figura 18. Analizador de espectros ópticos (OSA) usado para la caracterización de SRS

El Analizador de Espectros Ópticos (OSA) utilizado para realizar las pruebas se muestra en la Figura 18. El analizador es una parte muy importante del proyecto, debido a que nos permitirá analizar el comportamiento del espectro de la señal.

Este OSA cuenta con un rango de longitud de onda de 600 a 1700nm, por lo que lo hace ideal para este proyecto, ya que el láser utilizado trabaja a una longitud de onda de 1064nm. Otro dato de interés para realizar el proyecto es la cantidad de potencia máxima que se puede ingresar por alguno de los canales. Esta potencia máxima de entrada es de +20dBm. Esto quiere

decir que en ninguna circunstancia podría ingresar directamente la señal del láser al OSA sin esa separación en la fibra que se logra con el posicionador para que estén alineadas ambas fibras.

### 5.2.3 Fibra



*Figura 19. 25Km de Fibra SMF-28*

En la Figura 19 se muestra la fibra que se usará para este proyecto, se utilizará una fibra monomodo SMF-28, tiene un diámetro de núcleo de  $8.2\mu\text{m}$  y una longitud de 25Km.

Como se puede observar la fibra esta enrollada en un carrete y así es como será utilizada para ese proyecto, ya que no es necesario sacarla del carrete. Esta fibra no tiene el recubrimiento de plástico para que el volumen sea pequeño.

### 5.2.4 Pérdidas

Para esta configuración experimental se presentan pérdidas de varios tipos, tales como:

- Macrocurvaturas: puesto que los 25km de fibra están enrollados y sería complicado e impráctico extenderla y ponerla en posición recta, es necesario considerar las pérdidas por las curvaturas del carrete.
- Microcurvaturas: es imposible evitar pequeñas curvaturas cuando se trabaja con fibras ópticas en espacios pequeños como laboratorios, por tanto, es necesario considerar estas pérdidas.
- Por unión o empalme: estas pérdidas se muestra en la Figura 15 debido a los empalmes utilizados para interconectar los 25km de fibra óptica con el posicionador y el láser.
- Por absorción: el rango de estas pérdidas está registrado en la hoja de datos de la fibra, puesto que dependen de la fabricación.

Para este proyecto, se generaron pérdidas de manera intencionada para disminuir la potencia de la señal, con el objetivo de no ingresar potencias altas que puedan dañar el OSA.

Para tal propósito se usó el posicionador de tres ejes, en donde existe una separación de 1cm entre el acoplador de los 25km de fibra y el acoplador que va hacia el OSA.

Debido a que nos interesa la potencia de salida del láser; es decir, la potencia que se está ingresando a la fibra y no es de nuestro interés la potencia de entrada al OSA, el conteo de pérdidas es innecesario. Es decir, no es importante tener una medida exacta de las pérdidas solo es necesario saber que la señal sufre pérdidas muy grandes para poder ser ingresar al OSA. Por otro lado, no se podría utilizar un medidor de potencia ya que las potencias generadas en las mediciones serían muy altas para los medidores convencionales.

### 5.3 Medidas de Seguridad

Unos puntos muy importantes a considerar en el desarrollo de la parte experimental son la medida de seguridad y cuidado de los equipos.

Para el láser de 10W se deben de tomar en cuenta dos cosas. La primera es que se debe aumentar la potencia gradualmente. La segunda es que si se lleva a una potencia muy alta puede causar heridas si se tiene contacto con la señal de salida del láser, por lo que es de suma importancia tener cuidado al momento de utilizarlo.

En cuanto al OSA es necesario no sobrepasar la potencia máxima que soporta ya que puede causar daños en el equipo.

### 5.4 Fusión de Fibras

Como se ha mencionado anteriormente un empalme por fusión es una unión permanente entre dos fibras y para poder realizar este experimento se deben de unir en algunas partes las fibras. Para realizar cada empalme por fusión que se muestra en la Figura 15, se siguieron los siguientes pasos:

- Primero se preparan todos los materiales con los que se trabajará, es decir se prepara la fusionadora, los extremos de fibra a fusionar, la cortadora, las pinzas, cinta, cartón, etc.
- Una vez que se cuenta con el material se retira el revestimiento y recubrimiento de la fibra usando las pinzas, dejando el núcleo lo más descubierto posible.
- Se limpia con un pañuelo con alcohol o algún derivado, este punto es muy importante ya que debe estar lo más limpio que se pueda.
- Después de esto se coloca en la cortadora de fibras ópticas, esto es para cortar la punta de la fibra óptica y el corte quede lo más perpendicular posible.

- Después de que se ha cortado se coloca en las ranuras de la fusionadora, y se repiten los pasos con el extremo de la fibra con la que se va a hacer el empalme.
- Posteriormente, se colocan ambas fibras en la ranura de la fusionadora, se enciende y se revisa que estén bien colocadas para posteriormente se lleve a cabo la fusión.
- Una vez que se realiza la fusión, la misma fusionadora mide la pérdida en dB que tendrá ese empalme, por lo que se saca con cuidado de la fusionadora las fibras unidas y se colocan en un protector de empalmes, en su defecto, si no se cuenta con dicho protector, se puede poner en un cartón y sujetar con cinta para que quede firme el empalme.
- Se realizan todos los anteriores pasos con todos los empalmes que sean necesarios para montar el equipo en su lugar.

## 5.5 Hipótesis o Expectativa

Al analizar las señales enviadas a través del láser de 10W en diferentes medidas de potencia se verán reflejados los Stokes en el OSA, encontrando de esta manera la potencia necesaria para que aparezcan dichos Stokes y poder observar los comportamientos de los mismos. En el OSA aparecerá primeramente un pico a los 1064nm, este pico es el residual de bombeo y conforme se vaya aumentando la potencia de entrada, esta ira desapareciendo mientras que surge el primer Stokes. Es aquí la parte de mayor interés, a qué longitud de onda y potencia aparece el primer Stokes. Puesto que al igualar la potencia, el residual de bombeo y el primer Stokes habremos encontrado el umbral del primer Stokes. Si se sigue aumentando la potencia que entra a la fibra (bombeo), el primer Stokes comenzará a desaparecer mientras que surgirá el segundo Stokes, y así sucesivamente.

## 5.6 Resumen

Al saber acerca de cada componente tanto físicamente como teóricamente, se obtiene una idea más clara del experimento a realizar. En este capítulo se presenta el diagrama experimental, el cual es parte fundamental del proyecto.

En el presente proyecto se utilizan los siguientes componentes y equipo de laboratorio: láser de 10W con una potencia de bombeo de 1064nm, 25km de fibra óptica monomodo SMF-28, posicionador de tres ejes, el OSA, fusionadora de fibras ópticas, y herramientas para limpiar las fibras y realizar empalmes.

Cada uno de los componentes que se usan para este experimento tiene características específicas que contribuirán a la creación de los Stokes, si se cambia alguno de ellos,

exceptuando el posicionador, los Stokes pueden no aparecer o aparecer en diferentes longitudes de onda o de potencia.

En este capítulo se menciona que las pérdidas que ocurren en la señal, no importando que tipo de pérdida sea, no es necesario medirlas, ya que para este proyecto de tesis los únicos datos que realmente son de interés son la potencia de entrada a la fibra y las longitudes de onda a la que el residual y el Stokes aparecen, así como el comportamiento de estos.

Otro punto importante de este capítulo es la hipótesis o expectativa, puesto que sin esta parte no sabría que esperar o que buscar en mi señal de salida. Mediante la experimentación con el arreglo propuesto se espera poder observar el comportamiento de los Stokes, el valor de la longitud de onda en la cual aparece cada Stokes y si el residual de bombeo aparece a 1064nm. Las preguntas que quiero resolver de dichos Stokes son: ¿a cuanta potencia necesito poner el láser para que aparezca el Stokes?, ¿a qué valor de potencia debo aumentar para que llegue a su umbral?, ¿si aumento un poco más la potencia hasta donde llegaría antes de que comience a disminuir el primer Stokes y a aparecer un segundo Stokes? Y ¿a qué longitud de onda aparece el Stokes? Al resolver las preguntas anteriores, se habrá tenido éxito en este proyecto de tesis.

## CAPÍTULO 6. RESULTADOS

En la realización de este capítulo se utilizó la herramienta Origin 8 Pro para realizar el procesamiento de los datos obtenidos mediante el OSA y de esta forma observar las expectativas planteadas en el capítulo anterior.

Se realizaron 25 pruebas a diferentes potencias, para observar a que longitud de onda aparecían los Stokes y sus umbrales correspondientes.

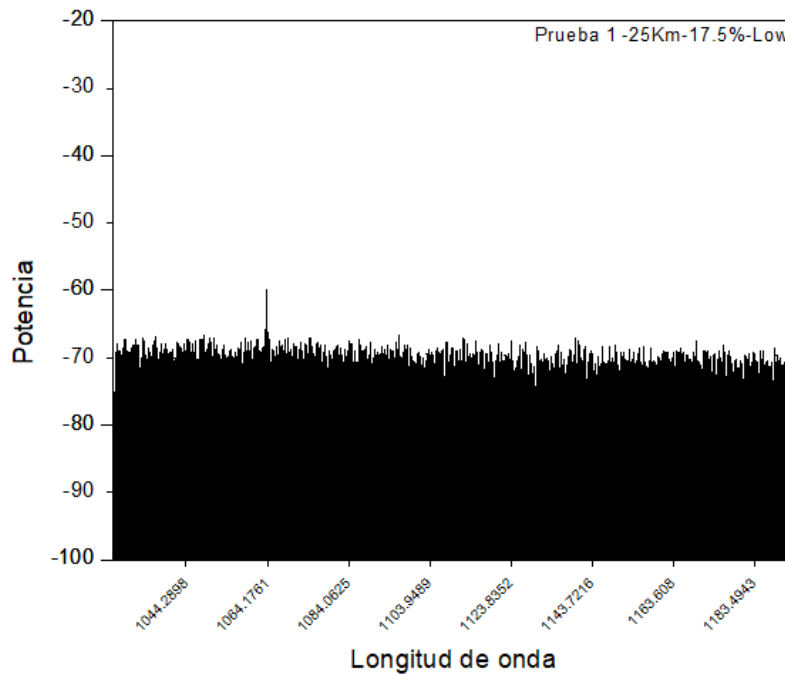


Figura 20. Prueba 1: Potencia de bombeo baja, a 17.5% de 10 W

Se inició la primera prueba con una potencia de entrada baja, en el láser marcaba que estaba a 17.5% de 10W. La primera gráfica obtenida es la que se muestra en la Figura 20, como se puede observar aparece un pico ligeramente por encima de la media, por lo que podríamos decir que aún se observa realmente el residual de bombeo.



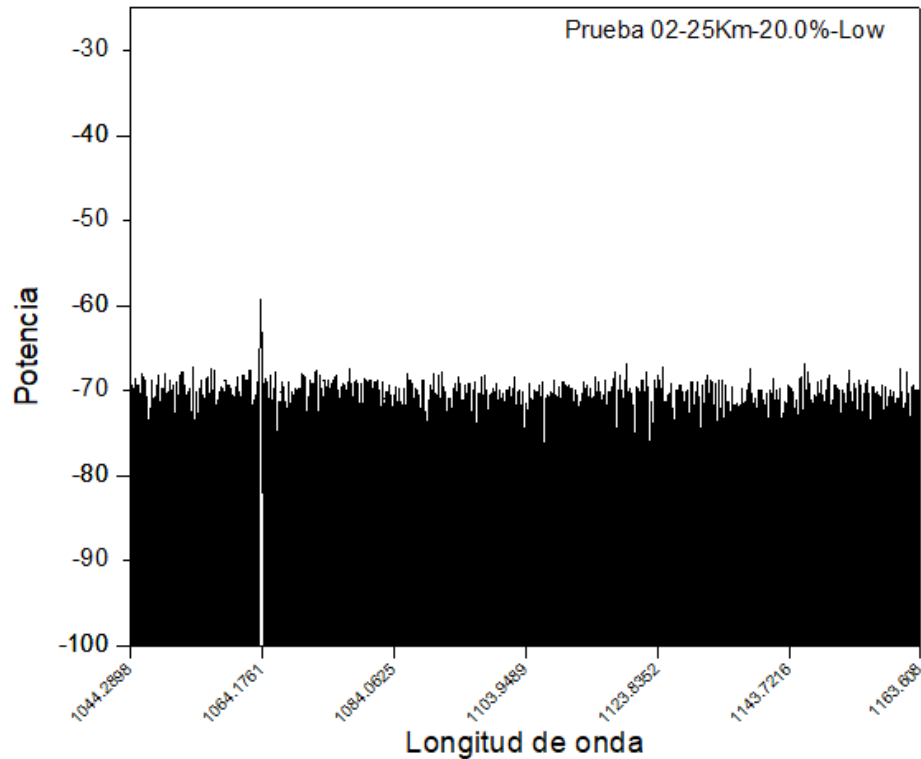


Figura 21. Prueba 2: Potencia de bombeo baja, a 20.0% de 10 W

En la Figura 21 se presenta la segunda prueba, para esta prueba el láser seguía marcando una potencia baja con un porcentaje de salida de 20% de 10W, sin embargo, comienza a verse el residual de bombeo y efectivamente comprobando lo que se dice en la teoría se encuentra a 1064nm, exactamente se encuentra en la posición de 1063.9773nm considerando que aún no se aumenta demasiado la potencia está muy cerca de los 1064nm.

La siguiente gráfica (Figura 22) muestra la tercera prueba. Para esta prueba se siguió aumentando la potencia a 22.5% de 10W, por lo que alcanzó una potencia de bombeo de 1.2 W. El pico más alto del residual de bombeo está situado en una longitud de onda de 1064.017nm.

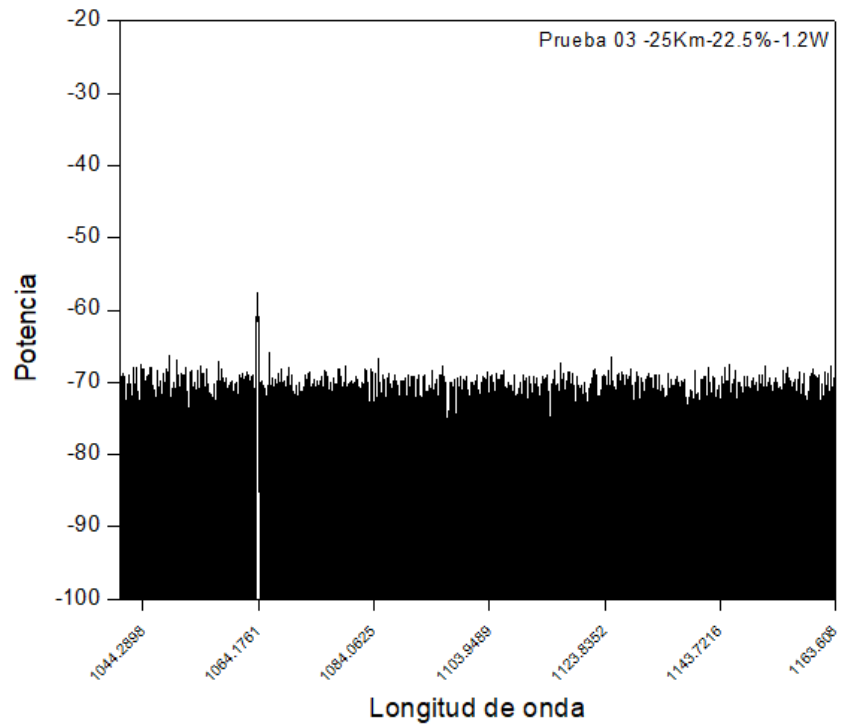


Figura 22. Prueba 3: Potencia de bombeo a 1.2W, a 22.5% de 10 W

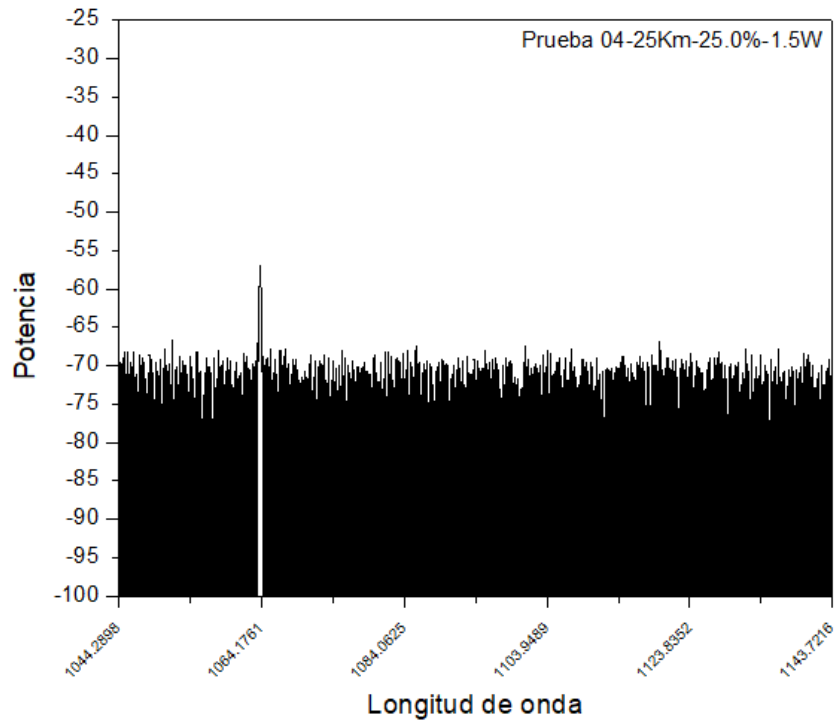


Figura 23. Prueba 4: Potencia de bombeo a 1.5W, a 25.0% de 10 W

La Figura 23 muestra la prueba 4. Al continuar aumentando la potencia, se puede observar que el residual inicia a ensancharse y se va adquiriendo mayor potencia. En este punto el residual de bombeo se encuentra en la longitud de onda de 1064.0568nm en su punto más alto, con una potencia de bombeo a 1.5W con un porcentaje en el láser de 25.0% de 10W.

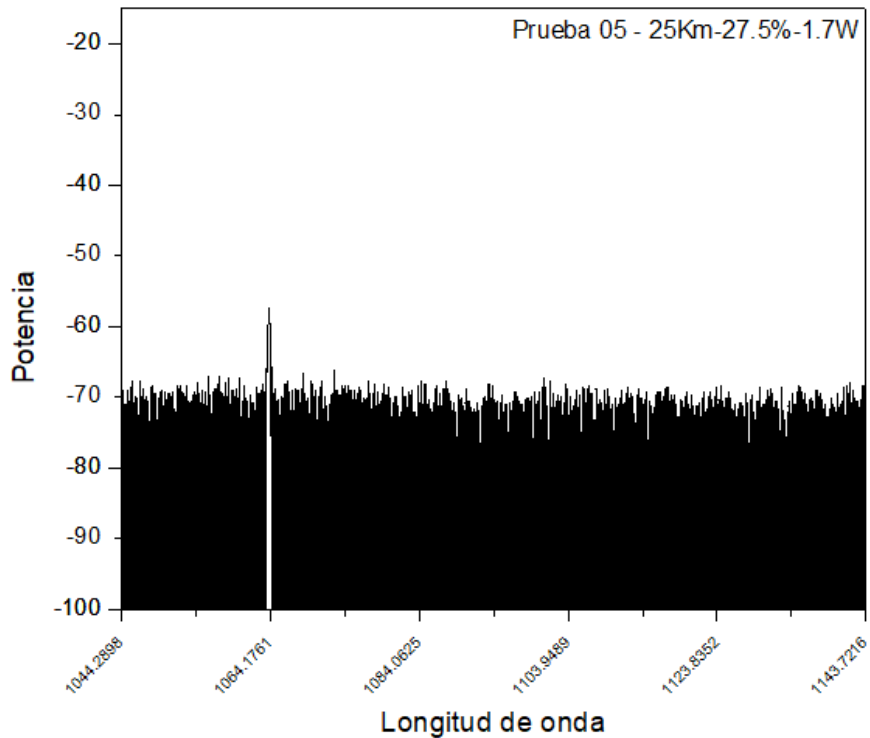


Figura 24. Prueba 5: Potencia de bombeo a 1.7W, a 27.5% de 10 W

La prueba 5 se muestra en la Figura 24. Su potencia de bombeo es de 1.7W con un nivel de porcentaje de 27.5% de 10W. Hasta este punto el residual de bombeo sigue en los 1064nm en el pico más alto.

Al seguir aumentando la potencia se obtuvo la prueba 6 (Figura 25). Aun no se ve la presencia del primer Stokes y el mismo residual sigue en los 1064nm en su longitud de onda. La potencia marcada para esta prueba es de 1.9W y tiene un nivel de porcentaje de 30% de 10W.

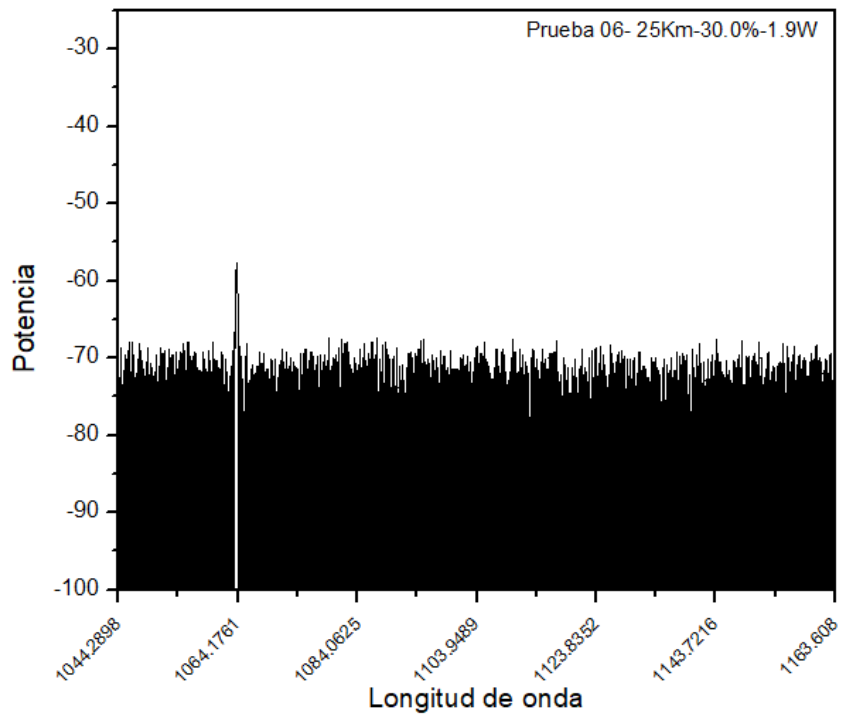


Figura 25. Prueba 6: Potencia de bombeo a 1.9W, a 30.0% de 10 W

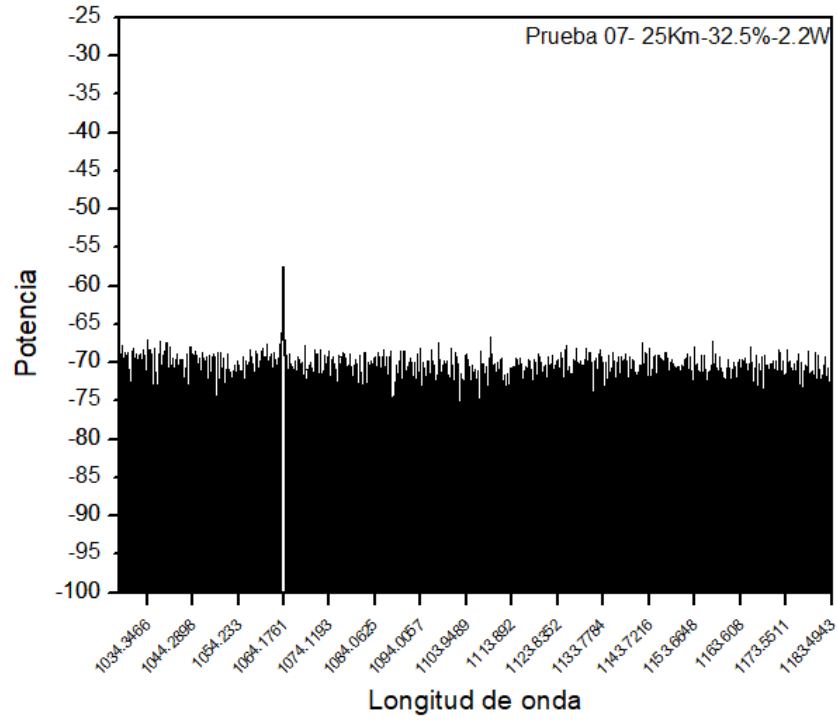


Figura 26. Prueba 7: Potencia de bombeo a 2.2W, a 32.5% de 10 W

Al seguir aumentando la potencia a un 32.5% de 10W, se puede observar que sigue apareciendo en la señal únicamente el residual de bombeo manteniéndose en 1064.0369nm. En esta prueba 7 el residual de bombeo alcanza una potencia de -57.354dBm (ver Figura 26).

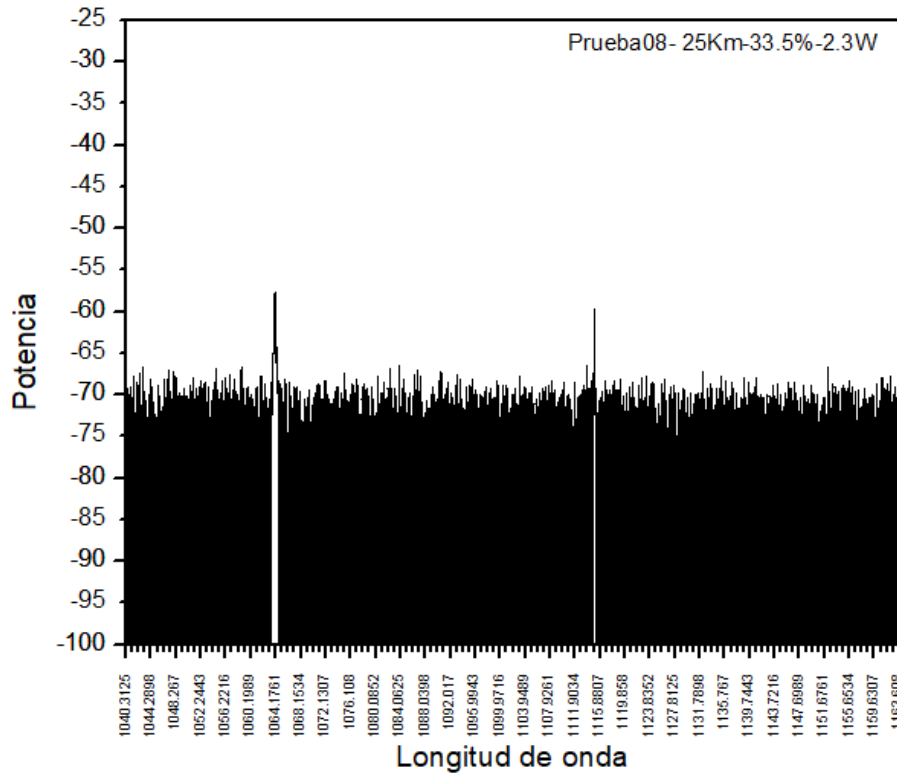


Figura 27. Prueba 8: Potencia de bombeo a 2.3W, a 33.5% de 10 W

Con 2.3W de potencia de bombeo se realizó la prueba 8. La Figura 27 muestra el residual de bombeo y el primer Stokes, el residual de bombeo se encuentra en su pico más alto exactamente a 1064.0369nm, mientras que el primer Stokes está a una longitud de onda de 1114.9659nm. Puede notarse también que el primer Stokes apenas comienza a aparecer.

En la prueba 9 (Figura 28), se puede distinguir que el residual de bombeo se empieza a hacer más pequeño, mientras que el primer Stokes va adquiriendo mayor potencia. Las coordenadas en el pico más alto de ambos son:

Res (1064.0568, -58.023)

S1 (1115.0057, -57.654)

Debido a que las potencias del residual de bombeo y del primer Stokes son muy similares, podríamos decir que hemos encontrado el umbral del primer Stokes, al ingresar en la fibra una potencia de bombeo de 2.3W, es decir, el umbral del primer Stokes es de 2.3W.

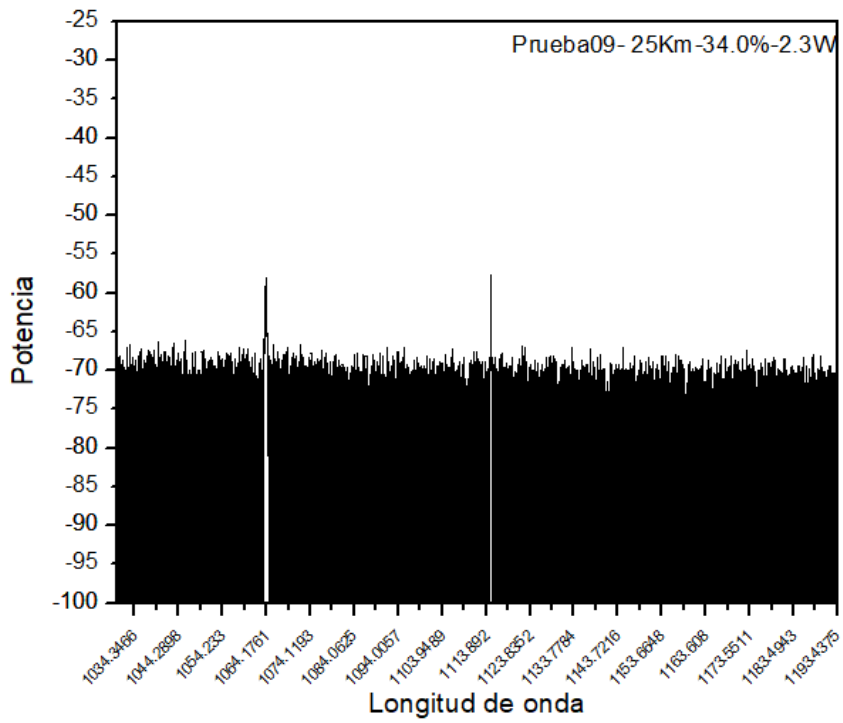


Figura 28. Prueba 9: Potencia de bombeo a 2.3W, a 34.0% de 10 W

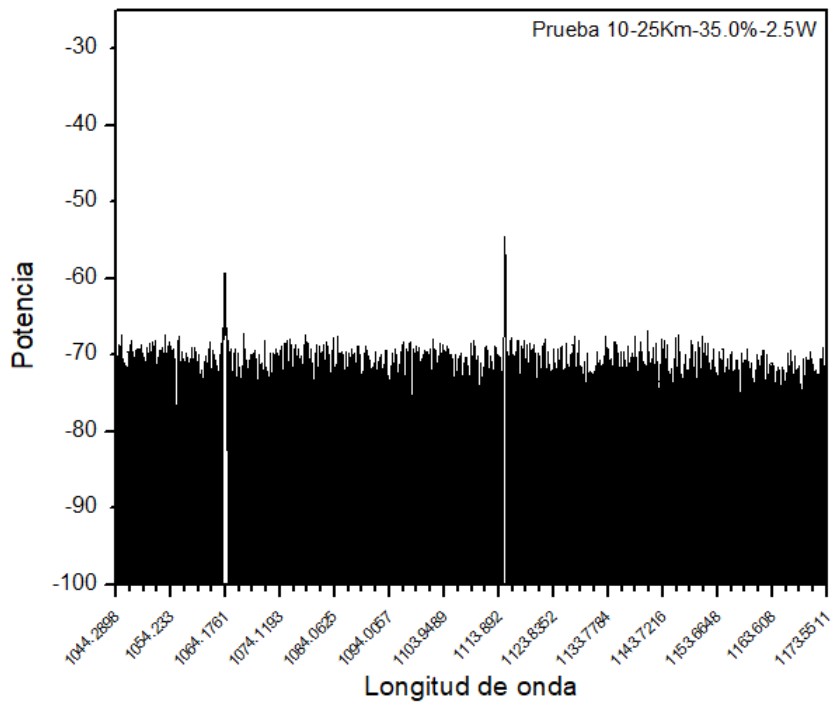


Figura 29. Prueba 10: Potencia de bombeo a 2.5W, a 35.0% de 10 W

La prueba 10 que se muestra en la Figura 29 se realizó al aumentar la potencia a 2.5W, teniendo así un porcentaje de 35.0% de 10W. En esta prueba se puede seguir observando el comportamiento del residual de bombeo y el primer Stokes. Su comportamiento indica que el residual de bombeo está disminuyendo a raíz de que la potencia de bombeo aumenta y consecuentemente se forma un primer Stokes que en este punto es más alto que el residual, pero no más ancho.

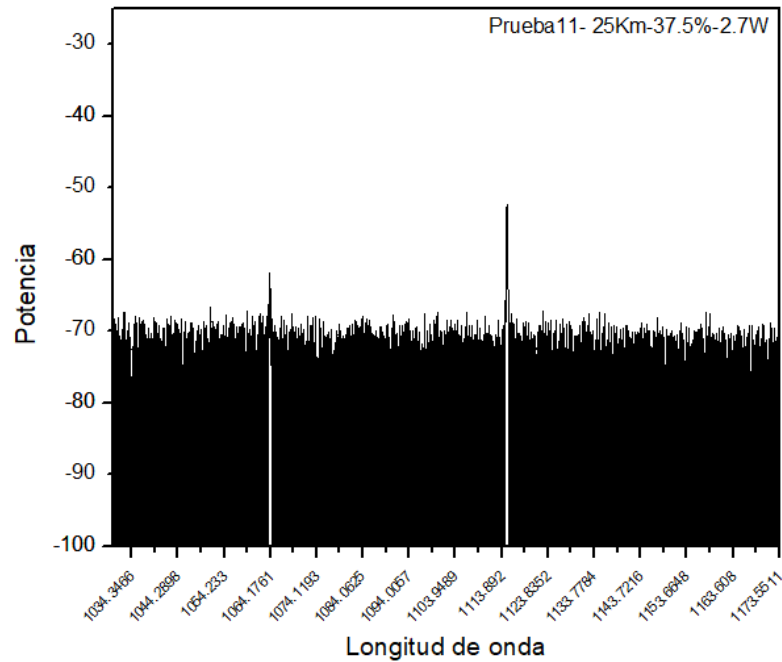


Figura 300. Prueba 11: Potencia de bombeo a 2.7W, a 37.5% de 10 W

En la prueba 11 (Figura 30) se puede apreciar el comportamiento del residual y el primer Stokes. En esta prueba se aumentó la potencia de bombeo a 2.7W por lo que el primer Stokes es ahora mucho más alto en relación con el residual. Se puede observar como poco a poco desaparece el residual, esto es debido a las no linealidades sumadas al residual.

Por otro lado, la prueba 12 que está en la Figura 31 es totalmente diferente. Pues al incrementar un poco más la potencia llegando a 3.0W el pico del residual de bombeo desapareció y el primer Stokes permanece en la longitud de onda de 1115nm mientras que aparece un segundo Stokes, muy cerca del primero, a 1121nm aproximadamente. En este punto el láser se ha llevado a un 40% de los 10W.

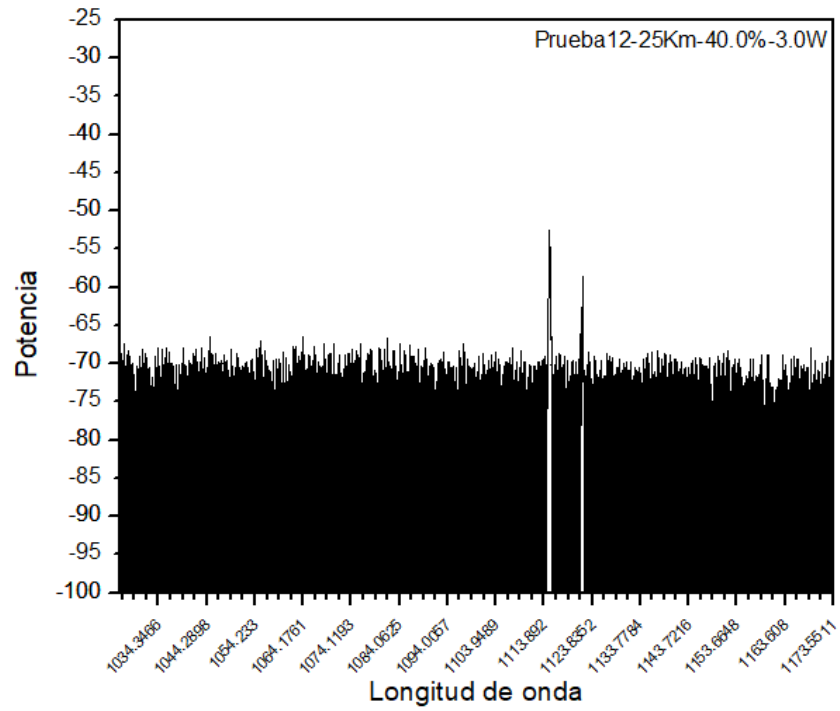


Figura 31. Prueba 12: Potencia de bombeo a 3.0W, a 40.0% de 10 W

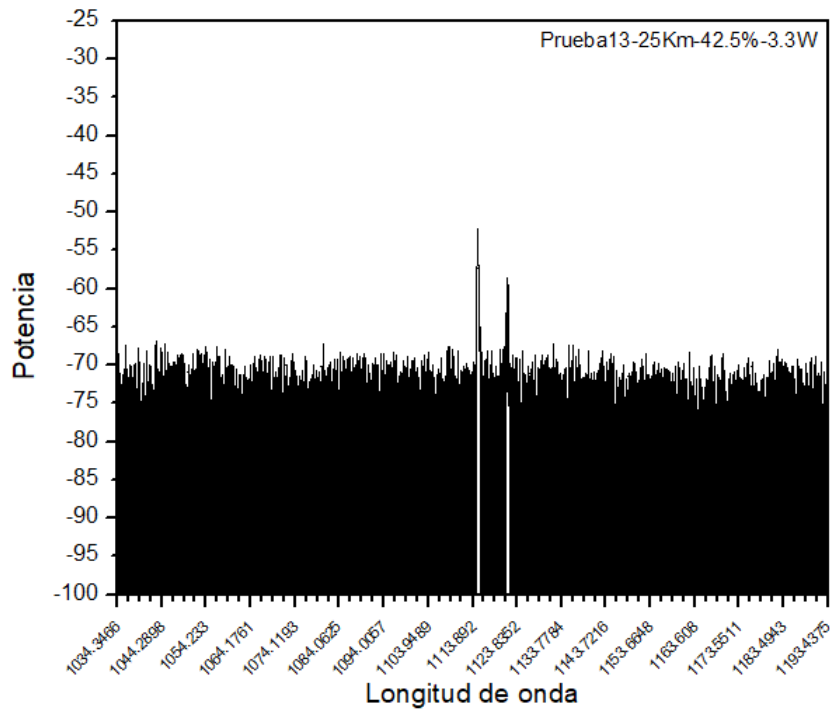


Figura 32. Prueba 13: Potencia de bombeo a 3.3W, a 42.5% de 10 W

Sin embargo, la Figura 32, que es la prueba 13 se aumentó la potencia aún más a una potencia de bombeo de 3.3W, con un porcentaje de 42.5% de 10W. Puede observarse que el



residual de bombeo no volvió a aparecer y el Stokes 1 sigue siendo más alto, a simple vista, que el Stokes 2. Las coordenadas, en el punto más alto, en la gráfica para Stokes 1 y Stokes 2 son:

S1 (1115.0057, -52.253)

S2 (1121.5682, -58.558)

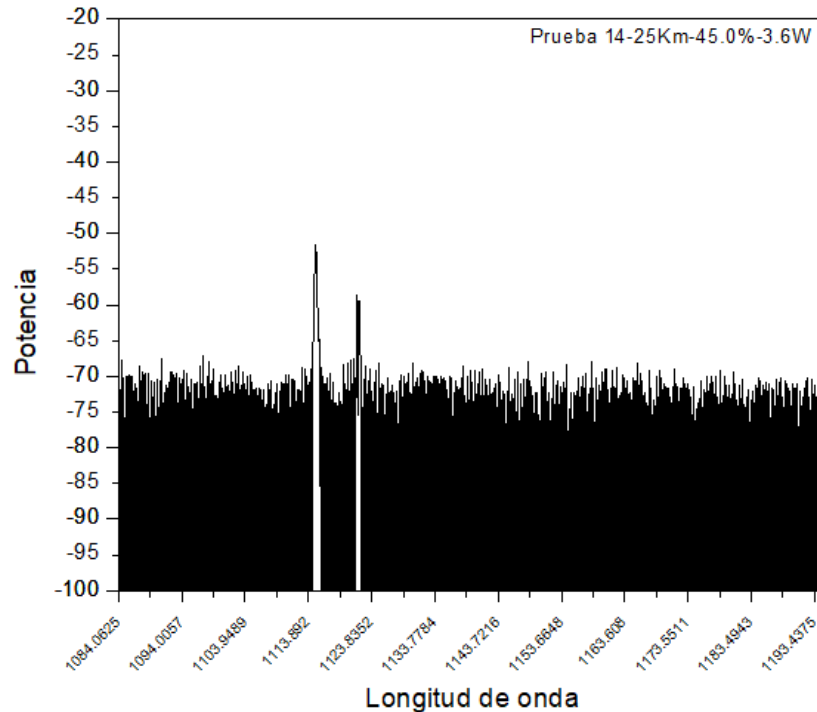


Figura 33. Prueba 14: Potencia de bombeo a 3.6W, a 45.0% de 10 W

Las pruebas 13 y 14 son muy similares, en ambas se presenta el Stokes 1 y el Stokes 2, siendo el Stokes 1 el que tiene mayor potencia. Sin embargo, al cambiar la potencia de bombeo y aumentarla a 3.6W las coordenadas de los Stokes son las siguientes:

S1 (1115.0057, -51.605)

S2 (1121.5682, -57.617)

A diferencia de la prueba 13, se puede observar que el pico más alto no se movió de la longitud de onda, pero, ambos Stokes aumentaron su potencia.

Para la prueba 15 se aumentó la potencia a 3.9 W, en este punto se puede observar un cambio significativo al analizar las coordenadas de los Stokes (ver Figura 34):

S1 (1115.0256, -52.346)

S2 (1121.5682, -56.553)

Al comparar la prueba 14 con la prueba 15, se puede observar que el Stokes 1 comienza a disminuir mientras que el Stokes 2 comienza a aumentar. Por tanto, la potencia de bombeo de la prueba 14 (3.6W) es la potencia necesaria para que el Stokes 1 llegue a su punto más alto.

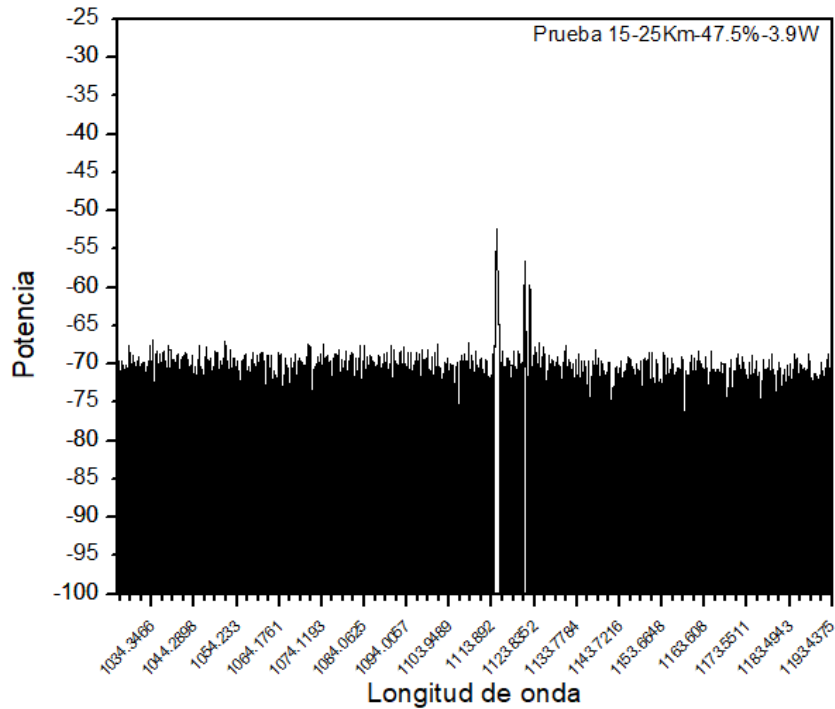


Figura 34. Prueba 15: Potencia de bombeo a 3.9W, a 47.5% de 10 W

En la prueba 16 (Figura 35), se aumentó la potencia a 4.2W. En esta prueba el láser marcaba 50% de los 10W. Como se puede observar los Stokes 1 y 2 están casi al mismo nivel. Puesto que el Stokes 1 disminuyó en su potencia y el Stokes 2 aumentó. También se puede observar que ambos Stokes se encuentran con un ancho muy similar. Las coordenadas de estos Stokes son:

S1 (1115.0057, -53.937)

S2 (1121.5881, -54.746)

Al analizar las coordenadas encontramos que a esta potencia (4.2 W), encontramos el umbral del Stokes 2, puesto que el S1 y el S2 se encuentran a una potencia muy similar en dBm.

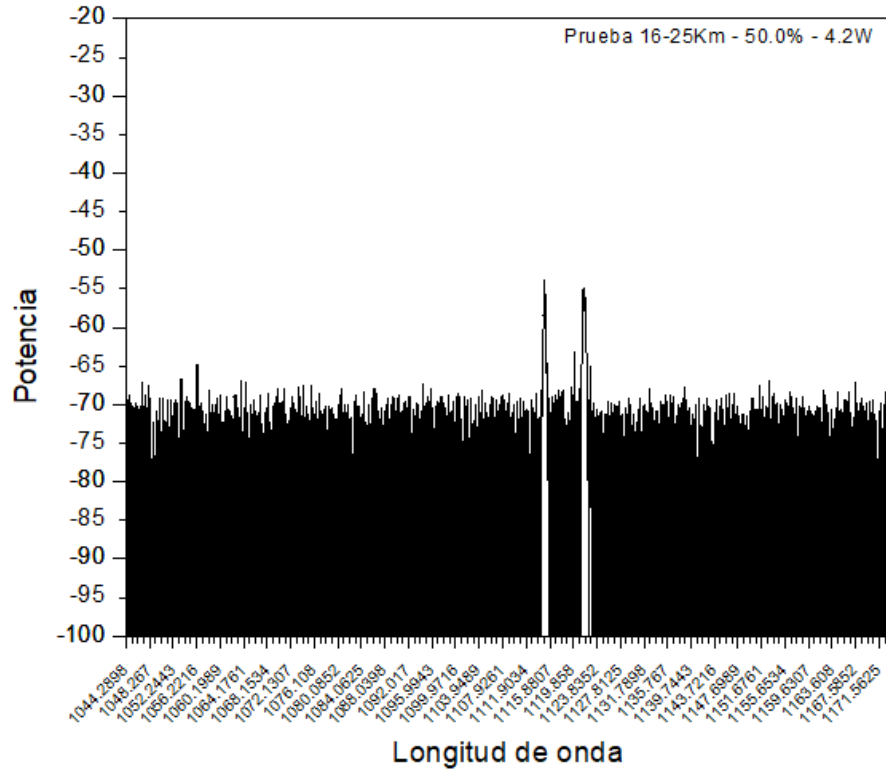


Figura 35. Prueba 16: Potencia de bombeo a 4.2W, a 50.0% de 10 W

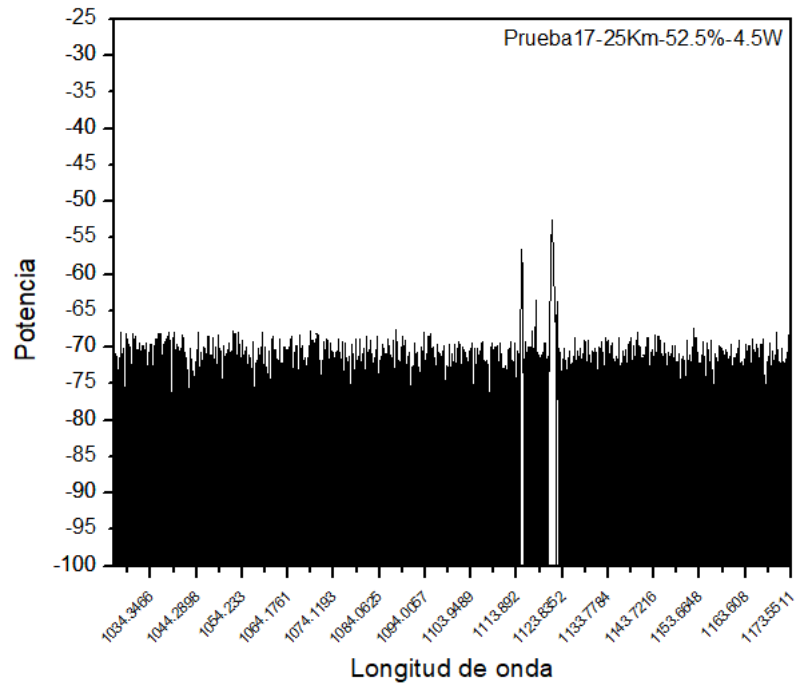


Figura 36. Prueba 17: Potencia de bombeo a 4.5W, a 52.5% de 10 W

La Figura 36 muestra la prueba 17. Esta prueba tiene una potencia de bombeo de 4.5W. Marcando un nivel de 52.5% de 10W. En esta prueba puede verse como ha disminuido significativamente el Stokes 1, mientras que el Stokes 2 aumentó en ancho y potencia. El Stokes 2 se ha mantenido en una longitud de onda de alrededor de 1121nm. Las coordenadas para el pico más alto de los Stokes son:

S1 (1115.0256, -56.494)

S2 (1121.5682, -52.467)

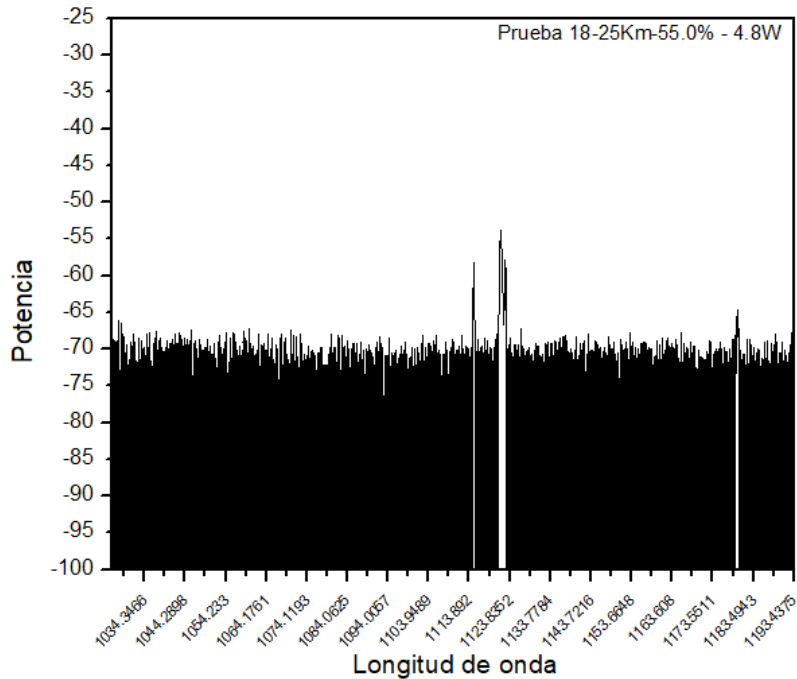


Figura 37. Prueba 18: Potencia de bombeo a 4.8W, a 55.0% de 10 W

En la prueba 18 (Figura 37), se puede observar que al aumentar la potencia en la señal de bombeo el Stokes 1 ha disminuido considerablemente, y el Stokes 3 ha comenzado a aparecer. Las coordenadas para el pico más grande de los tres Stokes son:

S1 (1115.0455, -58.246)

S2 (1121.5881, -53.729)

S3 (1179.6165, -64.55)

Se puede deducir de las coordenadas que el Stokes 3 apareció a una longitud de onda de 1179nm, el Stokes 2 se ha mantenido en la longitud de onda de 1121nm y el Stokes 1 en 1115nm. Sin embargo, al compararlo con la prueba 17 el avance del Stokes 1 y 2, puede notarse que comienzan a disminuir su potencia.

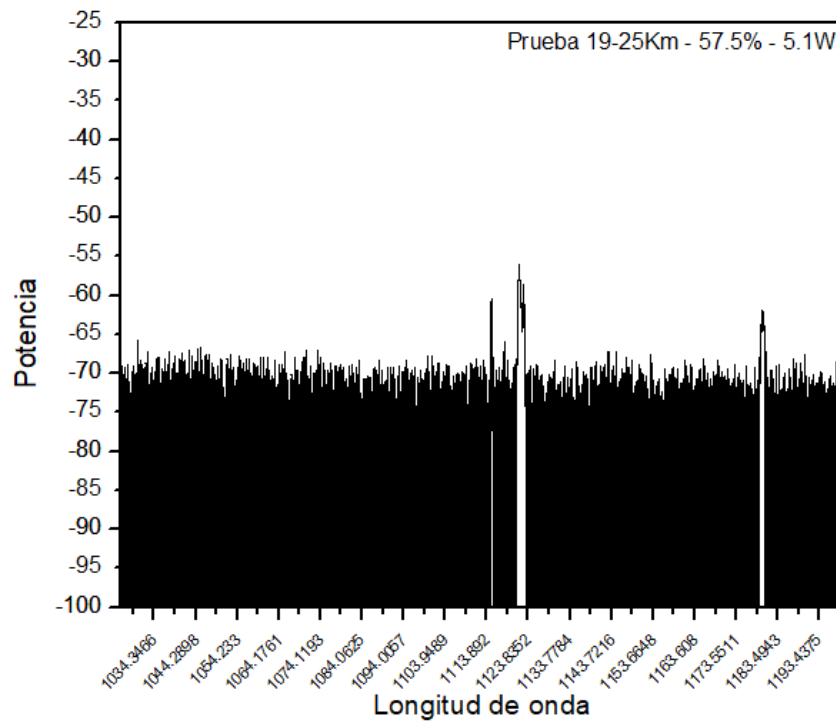


Figura 38. Prueba 19: Potencia de bombeo a 5.1W, a 57.5% de 10 W

En la prueba 19 (Figura 38), se aumentó la potencia hasta llegar a 5.1 W. En este punto el Stokes 1 aún se alcanza a ver, pero es casi nulo, el Stokes 2 se ha ensanchado aún más y el Stokes 3 ya está más definido. Los tres Stokes se mantienen siempre a la misma longitud de onda en su pico más alto.

Para la prueba 20 (Figura 39), se llevó el láser a 5.4W, obteniendo las siguientes coordenadas:

S1 (1115.0057, -60.817)

S2 (1121.5682, -55.014)

S3 (1179.5369, -60.306)

Deduciendo que el Stokes 1 y el Stokes 3 están casi a la misma potencia, mientras que el Stokes 2 es el que presenta mayor potencia. Los tres se mantienen en sus respectivas longitudes de onda.

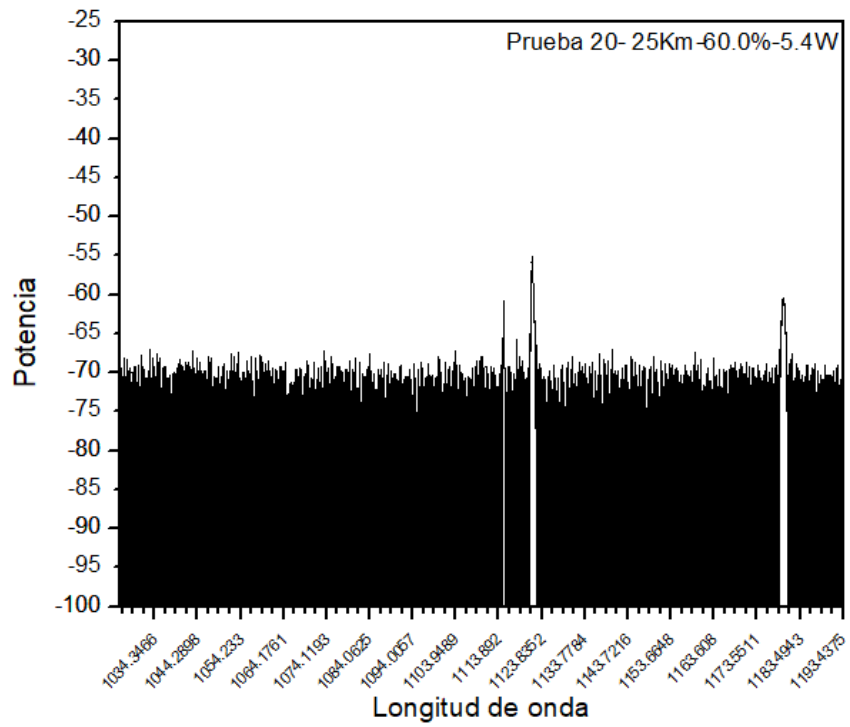


Figura 39. Prueba 20: Potencia de bombeo a 5.4W, a 60.0% de 10 W

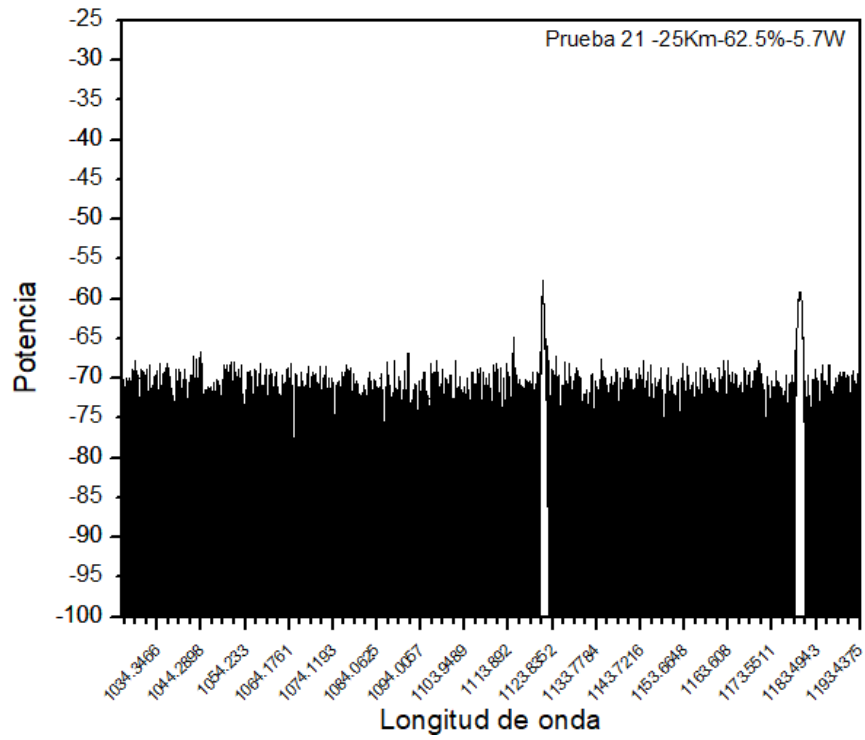


Figura 40. Prueba 21: Potencia de bombeo a 5.7W, a 62.5% de 10 W

En la prueba 21 ha desaparecido por completo el Stokes 1 y a simple vista pareciera que el Stokes 2 y el Stokes 3 están al mismo nivel de potencia. Para esta prueba se aumentó la potencia a 5.7W. Para verificar lo que se presenta en la gráfica, las coordenadas son:

S2 (1121.6278, -57.741)

S3 (1179.9545, -59.114)

Debido a que las potencias de S2 y S3 presentan niveles de potencia muy similares, se puede decir que en esta prueba se encuentra el umbral del Stokes 3 a 5.7W, como se muestra en la Figura 40.

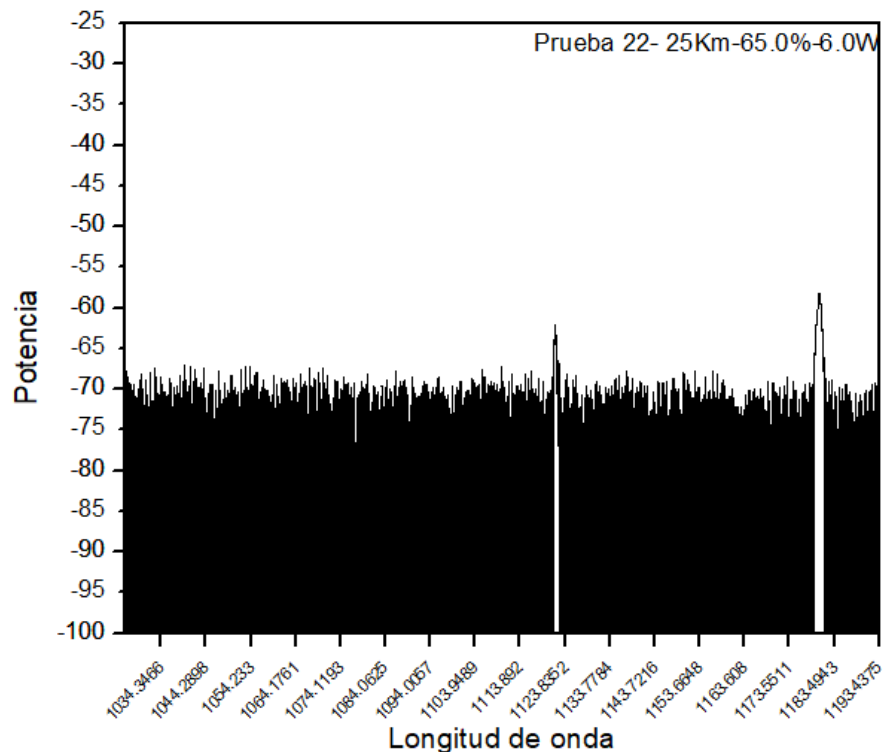


Figura 41. Prueba 22: Potencia de bombeo a 6.0W, a 65.0% de 10 W

Notoriamente al aumentar la potencia de bombeo a 6.0W y así obtener la prueba 22 (Figura 41), el Stokes 2 ha disminuido en gran medida, mientras que el Stokes 3 ha aumentado en altura y ancho, sin embargo, ambos se mantienen en sus respectivas longitudes de onda.

En la prueba 23 se ha aumentado aún más la potencia de bombeo hasta 6.3W, con un porcentaje de 67.5% de 10W. En este punto del proyecto, se puede observar cómo sigue aumentando el Stokes 3, mientras que el Stokes 2 va desapareciendo lentamente. Ahora el Stokes 3 tiene mayor ancho y presenta mayor potencia.

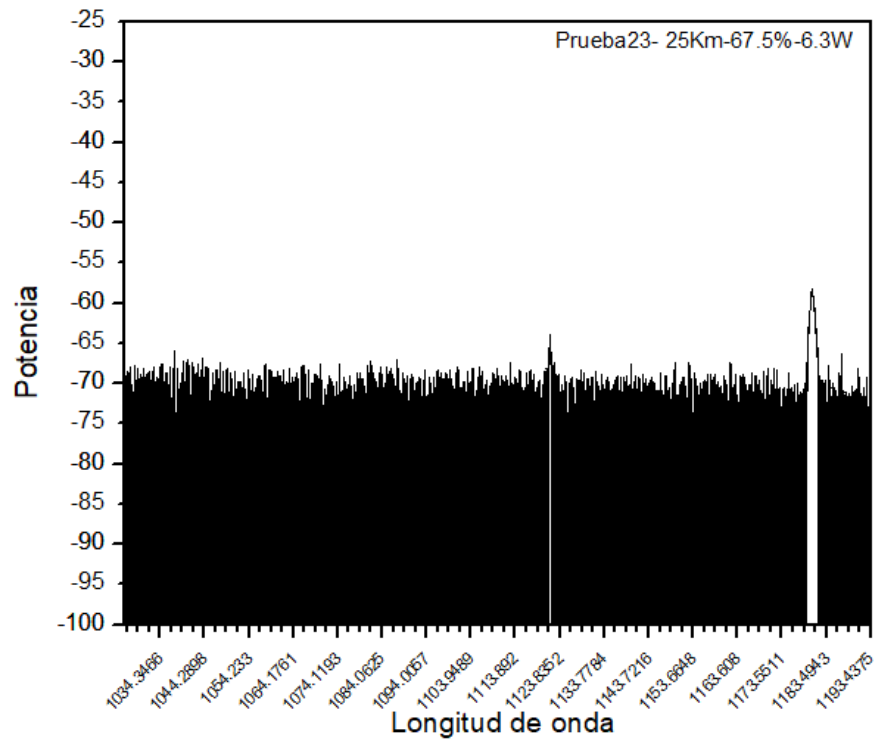


Figura 42. Prueba 23: Potencia de bombeo a 6.3W, a 67.5% de 10 W

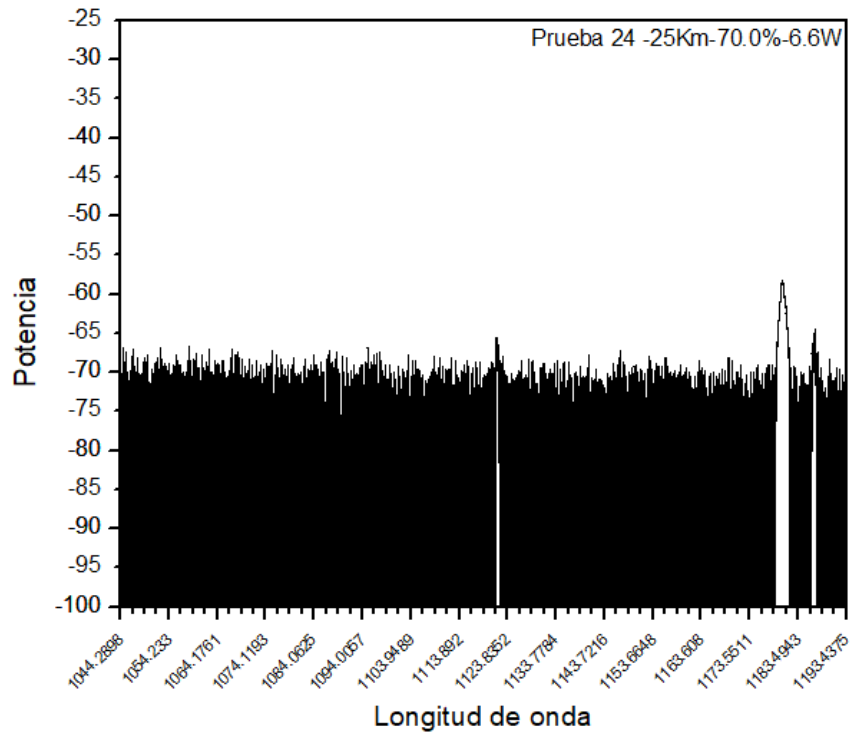


Figura 43. Prueba 24: Potencia de bombeo a 6.6W, a 70.0% de 10 W



La prueba 24 se encuentra en la Figura 43, para esta prueba se aumentó la potencia al 70%, marcando así una potencia de bombeo de 6.6 W. Esta potencia es bastante alta, por lo que el Stokes 2 casi desaparece por completo, mientras que el Stokes 3 ha aumentado en ancho y en altura. En esta prueba surge el Stokes 4 por primera vez a una longitud de onda de 1186nm. Las coordenadas para estos tres Stokes en su pico más alto son:

S2 (1121.5483, -65.449)

S3 (1180.3324, -58.283)

S4 (1186.9347, -64.435)

Por las coordenadas se sabe que el Stokes 3 sigue siendo el más alto, mientras que el Stokes 4 pasa a ser el segundo con mayor potencia mientras que el Stokes 2 está por desaparecer.

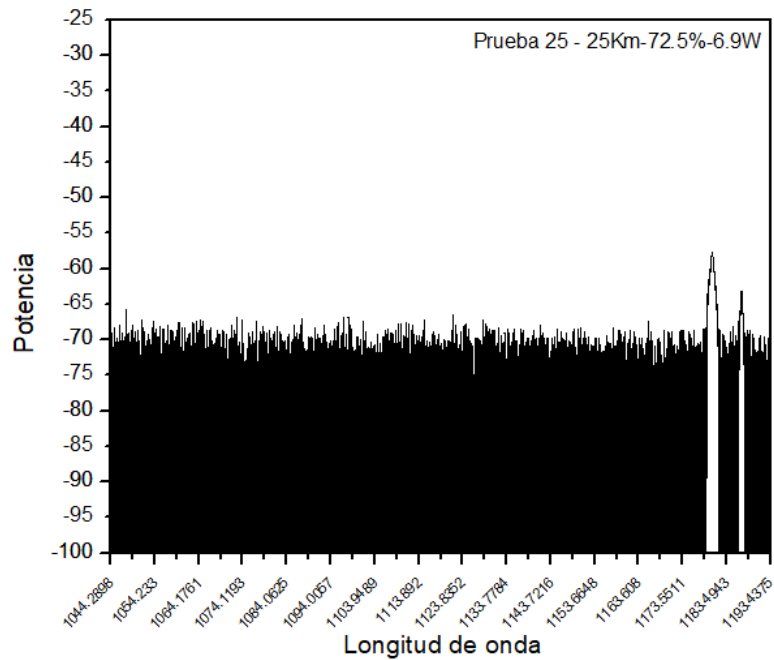


Figura 44. Prueba 25: Potencia de bombeo a 6.9W, a 72.5% de 10 W

En la Figura 44 se puede observar la última prueba realizada, esta prueba tiene una potencia de bombeo de 6.9W y se puede lograr ver el ancho del Stokes 3 comparado con el Stokes 4 y aun se puede lograr ver que sigue siendo más alto el Stokes 3. También se puede notar que ha desaparecido el Stokes 2 por completo.

Como se pudo observar durante las pruebas, si seguimos incrementando la potencia, en algún punto encontraremos el umbral del Stokes 4, posteriormente desaparecerá el Stokes 3, luego aparecerá el Stokes 5 y así sucesivamente.

Tabla 4. Tabla comparativa de Stokes

Número de Stokes	Porcentaje aumentado	Potencia de entrada a la fibra	Coordenadas Stokes, pico más alto (x,y)	Número de Prueba
--	17.5%	Baja	--	1
Res	20.0%	Baja	Res (1063.9773, -59.355)	2
Res	22.5%	1.2 W	Res (1064.017, -57.692)	3
Res	25.0%	1.5 W	Res (1064.017,-57.509)	4
Res	27.5%	1.7 W	Res (1064.017, -57.426)	5
Res	30.0%	1.9 W	Res (1064.017, -57.417)	6
Res	32.5%	2.2 W	Res (1064.0369, -57.354)	7
Res y S1	33.5%	2.3 W	Res (1064.0369, -57.545) S1 (1114.9659, -59.63)	8
Res y S1	34.0%	2.3 W	Res (1064.0568, -58.023) S1 (1115.0057, -57.654)	9
Res y S1	35.0%	2.5 W	Res (1064.0369, -59.303) S1 (1115.0057, -54.501)	10
Res y S1	37.5%	2.7 W	Res (1064.0767, -61.817) S1 (1115.0057, -53.849)	11
S1 y S2	40.0%	3.0 W	S1 (1115.0057, -52.549) S2 (1121.946, -58.617)	12
S1 y S2	42.5%	3.3 W	S1 (1115.0057, -52.253) S2 (1121.5682, -58.558)	13
S1 y S2	45.0%	3.6 W	S1 (1115.0057, -51.605) S2 (1121.5682, -57.617)	14
S1 y S2	47.5%	3.9 W	S1 (1115.0256, -52.346) S2 (1121.5682, -56.553)	15
S1 y S2	50.0%	4.2 W	S1 (1115.0057, -53.937) S2 (1121.5881, -54.746)	16
S1 y S2	52.5%	4.5 W	S1 (1115.0256, -56.494) S2 (1121.5682, -52.467)	17
S1, S2 y S3	55.0%	4.8 W	S1 (1115.0455, -58.246) S2 (1121.5881, -53.729) S3 (1179.6165, -64.55)	18
S1, S2 y S3	57.5%	5.1 W	S1 (1115.0057, -60.349) S2 (1121.5682, -54.727) S3 (1179.7358, -62.042)	19
S1, S2 y S3	60.0%	5.4 W	S1 (1115.0057, -60.817) S2 (1121.5682, -55.014) S3 (1179.5369, -60.306)	20
S2 y S3	62.5%	5.7 W	S2 (1121.6278, -57.741) S3 (1179.9545, -59.114)	21
S2 y S3	65.0%	6.0 W	S2 (1121.6278, -62.139) S3 (1180.2727, -58.414)	22
S2 y S3	67.5%	6.3 W	S2 (1121.5881, -63.933)	23

			S3 (1180.2727, -58.365)	
S2, S3 y S4	70.0%	6.6 W	S2 (1121.5483, -65.449) S3 (1180.3324, -58.283) S4 (1186.9347, -64.435)	24
S3 y S4	72.5%	6.9 W	S3 (1180.1534, -57.707) S4 (1186.8551, -63.063)	25

La Tabla 4 presenta un concentrado de todos los datos encontrados en las gráficas mostraron anteriormente con las 25 pruebas. La primera columna muestra los Stokes que se obtuvieron en cada prueba, la segunda y la tercera columna son los datos que marcaba el láser en cada prueba y la cuarta columna son las coordenadas de cada uno de los picos más altos por cada Stokes, siendo “x” la longitud de onda de cada Stokes en nm, y “y” es potencia en dBm registrada por el OSA.

Puede notarse que el porcentaje y la potencia en W, marcados por el láser no coinciden; por ejemplo, donde marcó el láser un 50% de 10W (prueba 16), en la tercera columna debería de haber marcado 5W, ya que por lógica el porcentaje está en relación de su capacidad máxima (10W), sin embargo marca 4.2 W. Realmente la cantidad a considerar es la mediada en Watts, puesto que los porcentajes son valores aproximados.

El porcentaje solo sirvió de referencia para ir aumentando la potencia para cada prueba. Generalmente realizaron incrementos de 2.5% en 2.5%, a excepción de la prueba 8 y 9, en las cuales interesaba observar más de cerca el comportamiento entre el residual y el Stokes 1.

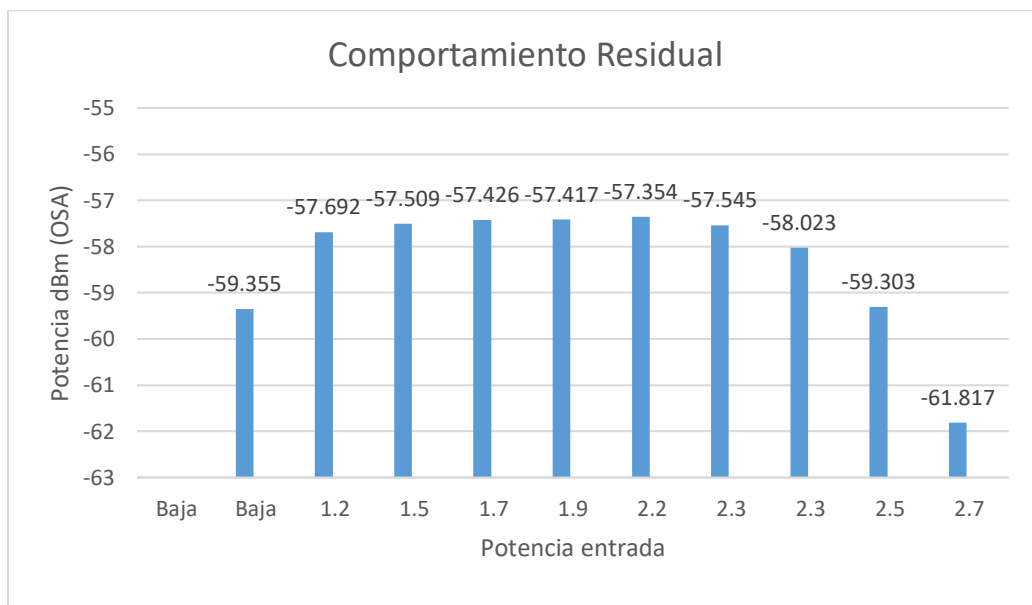


Figura 45. Comportamiento del Residual

La Figura 45 muestra el comportamiento que tuvo el residual a lo largo de las pruebas, en el eje “x” de la gráfica se representa la potencia de entrada a la fibra, es decir, la marcada en

el láser. En el eje “y” se marca la potencia que marcaba el OSA, en su punto más alto del residual. Debido a que en la primera prueba no se obtuvo ningún valor de la potencia residual, la primera barra de la gráfica toma valor de cero. El punto más alto del residual se obtiene al tener una potencia de entrada de 1.9W. Podría decirse también, que se mantiene como valor promedio en la potencia de -57dBm.

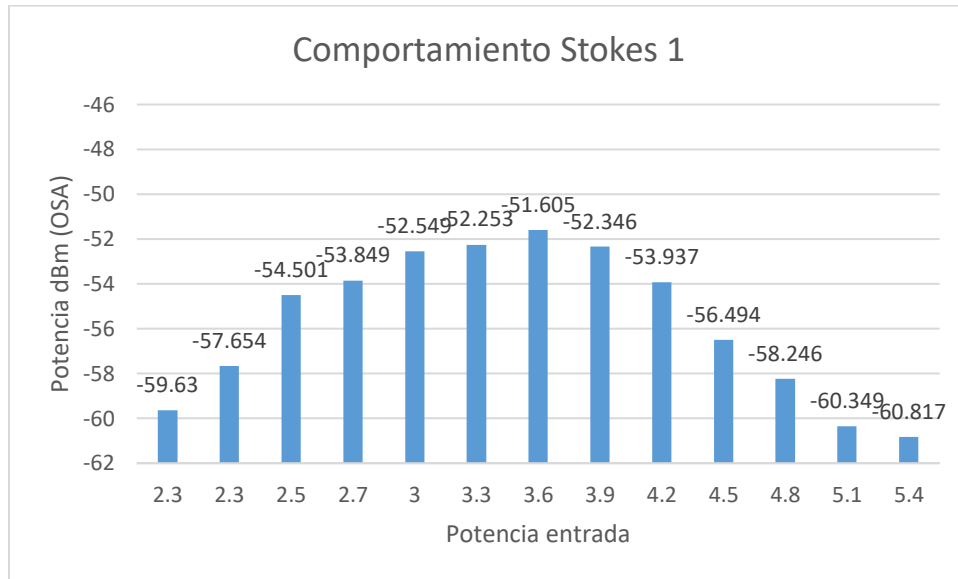


Figura 46. Comportamiento del Stokes 1

Por otro lado, en la Figura 46, se muestra el comportamiento del Stokes 1 desde que apareció hasta que desapareció por completo. Se puede ver que el pico más alto para este Stokes se encuentra a los -51.605dBm, al marcar una potencia de entrada de 3.6W. Los cambios entre 2.3 W y 5.7 W fueron más drásticos ya que estaba desapareciendo el residual, de igual forma en las últimas 3 pruebas en que aparece este Stokes puesto que estaba apareciendo el Stokes 3.

Puede verse que a pesar de que el umbral del Stokes 1 está marcado en 2.3W, continuó adquiriendo más potencia hasta llegar a un punto limite. De igual forma se observa en la Figura 47 con el comportamiento del Stokes 2, pues su umbral está marcado en 4.2 W y continuó creciendo hasta llegar a un punto máximo con 4.5 W, alcanzando una potencia de -52.467dBm. Para lograr que aparezca un segundo Stokes se necesitan 3W, y para lograr que desaparezca por completo se necesita una potencia de entrada de 6.6W. El Stokes 2 se comporta un poco más irregular que el Stokes 1, sin embargo, sucede lo que dice la teoría, que comienza a aumentar hasta alcanzar un punto máximo y después decrece dando paso al siguiente Stokes.

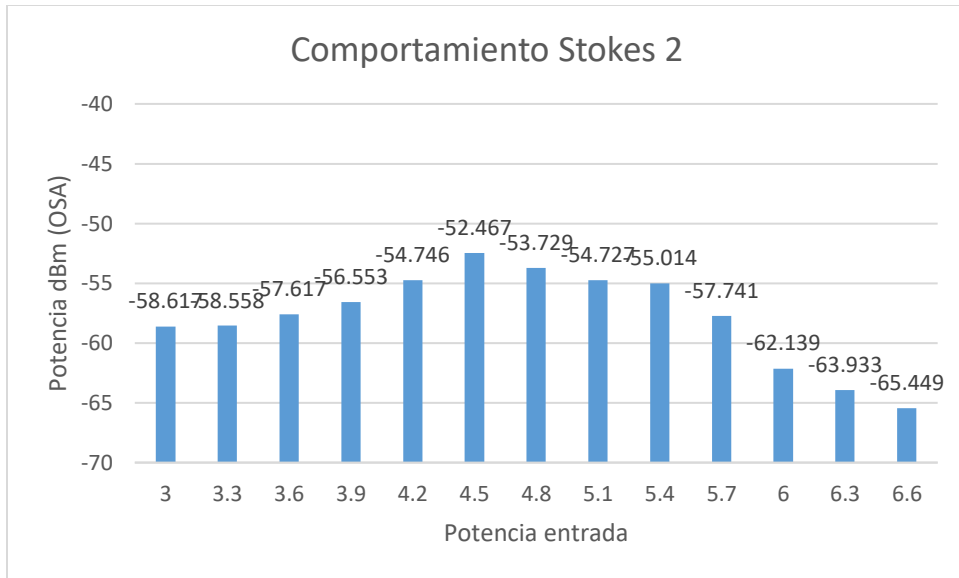


Figura 47. Comportamiento del Stokes 2

En la Figura 48, se muestra por último el comportamiento del Stokes 3, aunque no se muestra el comportamiento desde que aparece hasta que desaparece, puede notarse que hace lo mismo que el residual, los Stokes 1 y 2, comienzan a aumentar. Lamentablemente no es posible determinar el punto más alto al que llega el Stokes 3, puesto que nunca comienza a decrecer para poderlo saber. En las últimas dos pruebas a pesar de que ya estaba el Stokes 4 seguía aumentando el Stokes 3. Para lograr obtener el Stokes 3 se necesita 4.8W de potencia de entrada a la fibra.

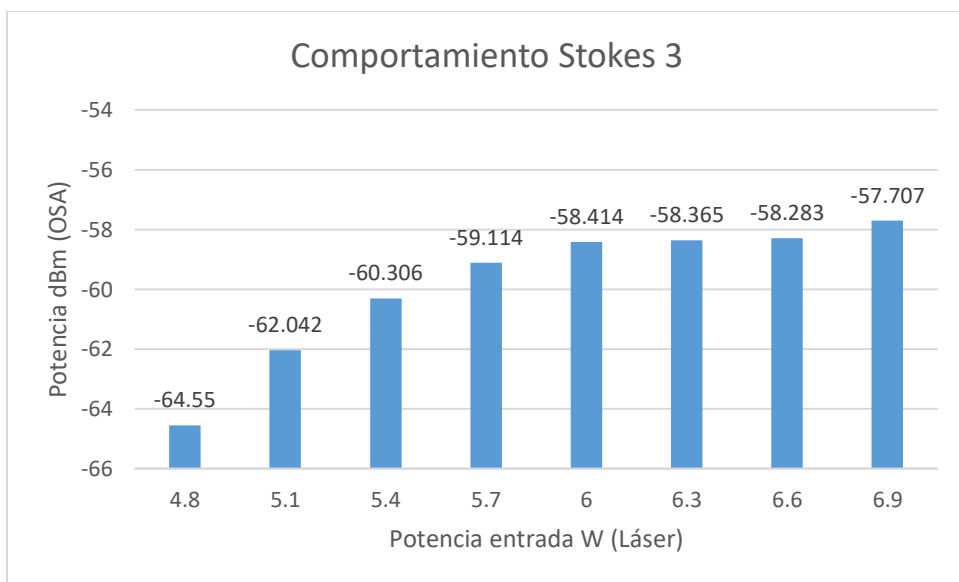


Figura 48. Comportamiento del Stokes 3

## CONCLUSIONES

El fenómeno no lineal SRS es el resultado del aumento de potencia de una señal, mostrándose en ondas de Stokes. Este fenómeno puede llegar a ser muy importante, ya que se puede utilizar como amplificadores de banda ancha o como láseres sintonizables. De igual manera, puede ser limitante para un sistema de comunicaciones ópticas ya que aparecen componentes Stokes que absorben la potencia de un canal de datos. Por tal motivo, es importante conocer los parámetros o límites de este fenómeno no lineal.

En este trabajo de tesis se anticipó de manera teórica lo que se observaría al enviar una señal óptica a través de 25km de fibra óptica al analizar la señal de salida. Se anticipó a que longitud de onda debería de aparecer el residual de bombeo en el extremo de la fibra.

Durante las pruebas realizadas se fue incrementando la potencia de acuerdo a un porcentaje de la potencia total del láser utilizado. Al aumentar la potencia aparece primero el residual a 1064nm como dice la teoría; se puede observar también, que conforme se fue incrementando la potencia, sin cambiar de longitud de onda, a los 2.2W aparece el Stokes 1.

Los Stokes tienen origen al ir sumando la potencia residual más las variantes de la fibra causados por los fenómenos no lineales; como la ganancia, el área efectiva de la fibra, etc. Y al realizar las pruebas se pudo observar que como mínimo se requieren 2.2W para obtener el primer Stokes, 2.7W para que desaparezca el residual de bombeo y aparezca el segundo Stokes. Se ocupan 4.8W para que se presente el tercer Stokes y 6.6 W para lograr ver un cuarto Stokes.

Se observa también que los Stokes solo continúan aumentando en potencia y no varían en su longitud de onda, teniendo así al primer Stokes en 1115 nm, el segundo Stokes a 1121nm, el tercero a 1180nm y el cuarto a 1186nm.

Realmente el comportamiento de los Stokes fue el que se describió en la teoría, puesto que alguno iba disminuyendo en potencia mientras que el otro incrementaba. El residual llegó a su potencia más alta en las pruebas cuando se introdujo en la fibra una potencia de 2.3W, mientras que el primer Stokes llegó a su punto más alto en las pruebas cuando se llevó al láser a 3.6W, con el Stokes 2 se logró a una potencia de 4.5W.

En cuanto a los umbrales, se obtuvieron los de los Stokes 1, 2 y 3. Cada Stokes llega a su umbral dependiendo de la potencia que se introduzca en la fibra. El umbral se obtuvo al analizar con mayor detenimiento los datos de sus picos más alto de cada Stokes y residual, plasmados todos en la Tabla 4.

Se obtuvo el umbral del Stokes 1, al comparar el residual con dicho Stokes. Si ambos estaban a la misma potencia en el OSA, o una potencia muy similar, se revisaba la potencia que marca el láser (potencia de entrada a la fibra) y dicha potencia es el umbral. Lo mismo para sacar el umbral del Stokes 2, se hace la comparación entre el Stokes 1 y 2. De igual forma para

el Stokes 3. De esta manera, el umbral del Stokes 1 se obtuvo a la potencia de 2.3W, el del Stokes 2 a los 4.2W y el umbral del Stokes 3 a los 5.7 W.

La tabla comparativa muestra los datos precisos en los picos más altos, y en las pruebas se observa el comportamiento de los Stokes así como en las Figuras 45, 46, 47 y 48. Teniendo, por lo tanto, el pico más alto para el residual de -57.419dBm a una potencia de entrada de 1.9W. El primer Stokes se presenta a la potencia de -51.605dBm al introducir 3.6W. Mientras que el segundo Stokes se alcanza a los -52.467dBm con una potencia de entrada de 4.5W.

También se puede concluir que se necesita una potencia baja para lograr ver el residual y para dejarlo de ver se requiere 2.7W. El Stokes 1 aparece en un rango de 2.3W a 7.4W. Mientras que para el Stokes 2 se ocupa una potencia mínima de 3W y para dejarlo de ver se ocupan 6.6W. Para comenzar a ver el Stokes 3 se necesita introducir una potencia de 4.8W. Y para el Stokes 4 se necesitan 6.6W para que aparezca.

## REFERENCIAS

- [1] Agrawal, G. P. (2002). *Fiber-Optic Communication Systems* (Vol. 3er edicion). Roshester NY: John Wiley and son, inc. Cap. 1, 2 y 6
- [2] Agrawal, G. (2001). *Nonlinear Fiber Optics* (Vol. 3er Edicion). Roshester, NY: Academic Press. Cap. 1, 7, 8, 9 y 10
- [3] Govind P. Agrawal, C. H. (2005). *Raman Amplification in Fiber Optical Comunication Systems*. California, USA: Elsevier Academic Press. Cap. 1 y 2
- [4] Buck (2004). *Fundamental of Optical Fibers*, Wiley: John Wiley and son, inc. Cap. 7 y 8
- [5] Reddy, M. H. (2014, Octubre). Optical Fibers-Principles and Applications. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 86-89.
- [6] Boyd, R. W. (2007). *Nonlinear Optics* (Vol. 3er edicion). Rochester, NY: A.P. cap. 1 y 8
- [7] Henry A. Guano Hidalgo. (2013). *Estudio y simulación de los efectos no lineales Scattering estimulado de Brillouin y Scattering estimulado de Raman*. Quito, Escuela politécnica nacional.
- [8] N. S. Kapany. (1967). *Fiber Optics: Principles and Applications*. New York: Academic Press.
- [9] New, G. (2011). *Introduction Nonlinear Optics*. Cambridge, NY: Cambridge University Press. Cap 3 y 5
- [10] Pastor, D., Ramos, F., Capmany, J. (2007). *Sistemas de Comunicaciones Ópticas*. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [11] M. N. Islam. (2004). *Raman Amplifiers for Telecommunications: Physical Principles*. Springer, New York.



## APENDICE 1. HOJA DE DATOS DEL LÁSER DE 10W

General Characteristics				
	YLR-10-LP	YLR-20-LP	YLR-50-LP	YLR-100-LP
Console Dimensions, mm	448 × 404 × 133			
Cooling	Air			
Supply Voltage, VAC	single-phase 50 - 60 Hz, 100 - 220			
Power Consumption, W	< 60	< 100	< 150	< 250

Optical Characteristics				
	YLR-10-LP	YLR-20-LP	YLR-50-LP	YLR-100-LP
Central Wavelength Range*, nm	1030 - 1070			
Central Wavelength Accuracy, nm	± 1			
Mode of Operation	CW/modulated			
Modulation Frequency, kHz	0 - 50			
Nominal Average Power**, W	10	20	50	100
Power Tunability, %	10 - 100			
Power Stability***, %	± 2			
Optical Noise, % RMS	< 2			
Polarization	Linear, > 50:1			
Beam Quality, M <sup>2</sup>	< 1.1			

## APENDICE 2. HOJA DE DATOS DEL OSA

### AQ6370C

Items	Specifications	
	Standard (-10)	High performance (-20)
Wavelength range <sup>1)</sup>	600 to 1700 nm	
Span <sup>1)</sup>	0.5 nm to 1100 nm (full span), and 0 nm	
Wavelength accuracy <sup>2), 3), 4)</sup>	±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 <sup>1), 2), 5)</sup>	±0.01 nm (1520 to 1580 nm), ±0.02 nm (1450 to 1520 nm, 1580 to 1620 nm)	
Wavelength repeatability <sup>1), 2)</sup>	±0.005 nm (1 min.)	
Wavelength resolution setting <sup>1), 2)</sup>	0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1 and 2 nm	
Wavelength resolution accuracy <sup>2), 3), 4), 6)</sup>	±5% (1450 to 1620 nm, Resolution setting: ≥ 0.1 nm, Resolution correction: ON, Number of sampling: AUTO)	
Min. sampling resolution <sup>1)</sup>	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 <sup>2), 3), 4), 7)</sup>	-90 dBm (1300 to 1620 nm), -85 dBm (1000 to 1300 nm), -60 dBm (600 to 1000 nm) (Sensitivity: HIGH3)	
Maximum input power <sup>2), 3)</sup>	+20 dBm (Per channel, full range)	
Maximum safe input power <sup>2), 3)</sup>	+25 dBm (Total input power)	
Level accuracy <sup>2), 3), 4), 8)</sup>	±0.4 dB (1310/1550 nm, Input level: -20 dBm, Sensitivity: MID, HIGH1-3)	
Level linearity <sup>2), 3)</sup>	±0.05 dB (Input level: -50 to +10 dBm, Sensitivity: HIGH1-3)	
Level flatness <sup>2), 3), 4)</sup>	±0.1 dB (1520 to 1580 nm), ±0.2 dB (1450 to 1520 nm, 1580 to 1620 nm)	
Polarization dependence <sup>2), 3), 4)</sup>	±0.05 dB (1550/1600 nm), ±0.08 dB (1310 nm)	
Dynamic range <sup>1), 2), 9)</sup>	Resolution: 0.02 nm	55 dB (Peak ±0.2 nm) 37 dB (Peak ±0.1 nm)
	Resolution: 0.05 nm	73 dB (Peak ±1.0 nm) 62 dB (Peak ±0.4 nm) 45 dB (Peak ±0.2 nm)
	Resolution: 0.1 nm	57 dB (Peak ±0.4 nm) 40 dB (Peak ±0.2 nm)
Stray-light suppression ratio <sup>1), 10)</sup>	73 dB	76 dB (Typ. 80 dB)
Optical return loss <sup>11)</sup>	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 <sup>1), 7), 9)</sup>	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 IEC60799-2, 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: Sparc ≤ 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 LA FIBRA MONOMODO 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. $\lambda$ (nm)	Max. $\alpha$ 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 ( $\lambda$ ) by more than the value  $\alpha$ .

### 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 ( $\lambda_{cc}$ )

$\lambda_{cc} \leq 1260$  nm

### Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD ( $\mu$ 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 ( $\lambda_0$ ): 1304 nm ≤  $\lambda_0$  ≤ 1324 nm

Zero Dispersion Slope ( $S_0$ ):  $S_0 \leq 0.092$  ps/(nm<sup>2</sup>·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<sub>0</sub>). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled.