

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE CIENCIAS**



**Investigación de Propagación de Pulsos Láser en Fibras Dopadas  
con Erblio Saturables**

TESIS

Que para obtener el grado de

Físico

Presenta:

**Anna Shlyagina**

Ensenada, Baja California, México. Junio de 2011

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE CIENCIAS**

**INVESTIGACIÓN DE PROPAGACIÓN DE PULSOS LÁSER EN  
FIBRAS DOPADAS CON ERBIO SATURABLES**

**TESIS PROFESIONAL**

**QUE PRESENTA**

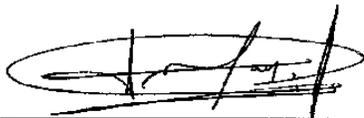
**ANNA SHLYAGINA**

**APROBADO POR:**



---

**DR. SERGUEI STEPANOV  
PRESIDENTE**



---

**DR. JUAN CRISÓSTOMO TAPIA MERCADO  
SECRETARIO**



---

**DR. MARCOS ANTONIO PLATA SÁNCHEZ  
MIEMBRO VOCAL**

Dedicado con mucho cariño a mis padres,  
que son mi ejemplo a seguir.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres a quienes siempre estaré agradecida por todo su apoyo, sus sabios consejos y todo ese amor que me impulsa a seguir siempre hacia adelante.

A mis asesores de tesis el Dr. Serguei Stepanov, Dr. Marcos Plata Sánchez y Dr. Juan Tapia Mercado, por su tiempo, paciencia, consejos y enseñanzas.

A mis amigos Kari, Elisa, Héctor, Meli, Froy, Kike, Andrei, Pawis muchas gracias por su invaluable amistad, los quiero muchísimo!

A todos mis maestros por contribuir en mi formación académica pero sobre todo por tener una excelente calidad humana.

A la UABC y CICESE por el gran apoyo que nos brinda a todos los estudiantes.

Ensenada, Baja California, México, junio de 2011.

RESUMEN de la Tesis de Anna Shlyagina presentada como requisito parcial para la obtención de la Licenciatura en Física.

### INVESTIGACIÓN DE PROPAGACIÓN DE PULSOS LÁSER EN FIBRAS DOPADAS CON ERBIO SATURABLES

En este trabajo se estudió la propagación de señales periódicamente moduladas en fibras dopadas con erbio con saturación óptica por dos métodos: la investigación de la luz lenta por medio de la transmitancia y por medio de la fluorescencia transversal.

Se estudió experimentalmente el desfase fraccional entre las señales de entrada y salida de la fibra dopada con erbio, por medio de la medición de la forma y de la intensidad de potencia de luz transmitida. Los experimentos se realizaron bajo varias condiciones experimentales.

Se desarrolló un nuevo método para la observación de la propagación de los pulsos utilizando la fluorescencia transitoria en la superficie de la fibra. Se realizaron mediciones de la señal de fluorescencia transversal transitoria (es decir, excitada por los pulsos de luz modulada) al inicio de la fibra (para conocer cómo es la respuesta de la señal de fluorescencia ante el cambio de algunos parámetros) y al final de la fibra. Así mismo, se realizaron mediciones equidistantes de la señal de fluorescencia a lo largo de toda la fibra. Con la información obtenida a través de la fluorescencia, se pudo reconstruir cómo va cambiando el desfase de la señal, su amplitud y su potencia a lo largo de la fibra.

Se realizó una simulación numérica en Matlab para la investigación de la luz lenta por medio de la transmitancia y por medio de la fluorescencia transversal. Se compararon los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio con los resultados teóricos mediante la simulación numérica, obteniendo un buen ajuste para ambos métodos.

Resumen aprobado:



---

Dr. Serguei Stepanov

# ÍNDICE GENERAL

Introducción.....	1
Capítulo 1. Conceptos básicos	
1.1 Luz: Dualidad de onda y partícula .....	3
1.2 Velocidad de fase y velocidad de grupo .....	5
1.3 Propagación de un pulso en un medio dispersivo .....	7
1.4 Ecuaciones de razón para un sistema de dos niveles .....	9
1.4.1 Saturación de absorción óptica en sistemas de dos niveles .....	12
1.5 Fibras ópticas .....	13
1.5.1 Fibras dopadas con erbio .....	16
Capítulo 2. Equipo y materiales	
2.1 Láser .....	21
2.2 Fotodetector .....	22
2.3 Elementos de la fibra óptica .....	23
2.3.1 Conectores .....	23
2.3.2 Acoplador .....	24
2.3.3 Atenuador óptico variable .....	24
2.3.4 Aislador .....	24
2.4 Equipo electrónico .....	25
2.4.1 Analizador de espectros .....	25
2.4.2 Osciloscopio .....	25
2.4.3 Generador de funciones .....	25
2.4.4 Amplificador Lock in .....	26

2.5 Fibras dopadas con erbio .....	26
2.5.1 Cálculo experimental de la potencia de saturación .....	27
2.5.2 Cálculo experimental de la densidad óptica de la fibra .....	29
 Capítulo 3. Investigación experimental de la luz en FDE	
3.0 Introducción .....	30
3.1 Investigación experimental de la luz lenta por medio de la transmitancia .....	30
3.1.1 Arreglo experimental .....	30
3.1.2 Resultados .....	32
3.1.3 Conclusiones parciales .....	34
3.2 Investigación experimental de la luz lenta por medio de fluorescencia transversal .....	35
3.2.1 Introducción .....	35
3.2.2 Arreglo experimental .....	36
3.2.3 Resultados .....	36
3.2.4 Conclusiones parciales .....	43
 Capítulo 4. Simulación numérica	
4.0 Introducción .....	45
4.1 Método numérico .....	45
4.2 Resultados gráficos de la simulación numérica .....	48
4.3 Conclusiones parciales .....	51
 Capítulo 5. Análisis y discusiones	
5.0 Introducción .....	53
5.1 Comparación de los datos experimentales con los teóricos .....	53

5.2 Conclusiones parciales .....	60
Capítulo 6. Resultados principales y conclusiones de trabajo.....	62
Referencias.....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Los átomos interactúan con la radiación de tres maneras: (a) absorción; (b) emisión espontánea; (c) emisión estimulada.....	4
1.2	Representación esquemática de un pulso óptico en términos de varias componentes espectrales.....	6
1.3	Propagación de un pulso óptico a través de un medio con dispersión normal y anómala. En el medio de dispersión normal, las componentes del pulso que conforman las longitudes de onda más cortas (A), llegan después que las de longitudes de onda más largas (R). Para la dispersión anómala, el comportamiento es al revés. Se dice que el pulso tiene un barrido.....	7
1.4	En un sistema de dos niveles, el aumento de la absorción (a) en la vecindad de la resonancia, da lugar a un cambio brusco del índice de refracción (b). Luz lenta se obtiene cuando el $n_g$ es grande y positivo, indicado por la parte sombreada de la figura (c).....	9
1.5	El ángulo de aceptación de la fibra ( $\theta_a$ ). Los rayos de luz que estén dentro del cono de aceptación, serán guiados por la reflexión total interna. Fibras con valores de NA grandes tienen mayor capacidad de captar luz que las fibras con NA menor.....	16
1.6	Sistema energético de tres niveles de los iones de erbio, en vidrio de sílice. El láser de bombeo a 980 nm excita los iones de erbio del estado energético $E_1$ al $E_3$ , que después de 6 $\mu$ s tienen una transición al nivel metaestable, $E_2$ . La inversión de población entre el estado $E_1$ y $E_2$ es responsable de la amplificación de la señal a una longitud de onda de 1550nm.....	17
1.7	Avance fraccional de las señales de saturación/prueba con $\lambda_s=1568$ nm (cuadros vacíos) y $\lambda_p=1526$ nm (cuadros rellenos) a una potencia promedio de entrada de 2 y 0.5 mW respectivamente. Los círculos y triángulos, presentan el avance fraccional inducido por la señal modulada de saturación a 1268nm en la señal de prueba para modulación en fase y anti-fase respectivamente.....	19
1.8	Avance fraccional observado en la señal de prueba como función del ángulo de fase entre las señales de prueba y saturación. ( $\lambda_s=1568$ nm, $P_s=2$ mW y $\lambda_p=1526$ nm $P_p=0.5$ mW). La línea continua es un ajuste teórico.....	19
1.9	Dependencia de la frecuencia y de la potencia de bombeo observada en la propagación a través de fibra dopada de erbio. La señal de entrada fue modulada sinusoidalmente cuya longitud de onda era 1550nm y una potencia promedio de 0.8 mW. Los puntos son datos experimentales y las líneas continuas son ajustes teóricos. Las diferentes curvas representan diferentes potencias de bombeo.....	20
2.1	Espectro de emisión del láser. El pico de emisión se da en una longitud de onda de 1526nm.....	22

2.2	Curva de responsividad (a) y circuito eléctrico interno (b) del fotodetector DET410 de Thorlabs.....	23
2.3	Tipos de contactos entre los extremos de férulas de los conectores; plano(a), PC/SPC (b), APC (c).....	24
2.4	Conectores y empalmes de la fibra HG980. FC, conectores; FDE, fibra dopada con erbio; EMP, empalme; FSTD, fibra estándar SMF28.....	26
2.5	Cálculo de la potencia de saturación para la fibra HG980.....	28
2.6	Espectro de transmitancia para la fibra HG980 de 3m (a), densidad óptica de la fibra en función de la longitud de onda (b). Para la longitud de onda de 1526 nm el valor es de la densidad óptica es de 1.9.....	29
3.1	Diagrama del arreglo experimental para el estudio del comportamiento de los pulsos de luz que se propagan a través de una fibra dopada con Erbio.....	31
3.2	Desfase fraccional como función de la longitud de la FDE, frecuencia y profundidad de modulación.....	32
3.3	Desfase fraccional como función de la frecuencia, potencia de entrada y profundidad de modulación.....	34
3.4	Diagrama del arreglo experimental para el estudio del comportamiento de los pulsos de luz que se propagan en la fibra dopada con erbio, por el método de fluorescencia transversal transitoria.....	36
3.5	Desfase fraccional (a) y amplitud (b) de la señal de fluorescencia medida al inicio de la fibra como función de la frecuencia de modulación ( $P_0=0.53$ mW, $m=100\%$ ).....	37
3.6	Amplitud relativa (a) y desfase fraccional (b) como función de la profundidad de modulación ( $P_0=1$ mW).....	37
3.7	Señal de fluorescencia a 5 cm del inicio de la fibra, con una potencia de entrada de 1.05 mW, frecuencia de 70 Hz y profundidades de modulación, $m=30$ (a), 60 (b) y 100% (c).....	38
3.8	Señal de fluorescencia a lo largo de la fibra. Potencia promedio de entrada 2.1 mW, frecuencia de modulación de 70 Hz y profundidad de modulación, $m=100\%$ .....	39

3.9	Desfase fraccional (a) y profundidad de modulación (b) como función de la distancia. Frecuencia de modulación 70 Hz, m=100%. Los círculos representan la señal cuya potencia de entrada, $P_o$ , era de 1.05 mW, los triángulos $P_o=2.1$ mW y los cuadrados $P_o=3.157$ mW.....	40
3.10	Señal de fluorescencia a lo largo de la fibra con una potencia de entrada de 3.157 mW, m=30% y una frecuencia de modulación de 40 Hz.....	41
3.11	Señal de fluorescencia a lo largo de la fibra con una potencia de entrada de 3.157 mW, m=30% y una frecuencia de modulación de 200 Hz.....	41
3.12	Desfase fraccional como función de la distancia (a) y profundidad de modulación como función de la distancia (b) para la señal de fluorescencia a lo largo de la fibra. Potencia de entrada 3.157 mW, profundidad de modulación de 30%. Los cuadrados representan la señal de entrada que fue modulada a 40 Hz y los círculos a la señal que fue modulada a 200 Hz.....	42
3.13	Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación de la señal de fluorescencia al final de la fibra al haber sustraído el desfase fraccional de señal de fluorescencia al inicio de la fibra (a 5 cm). Potencia de entrada 0.53 mW y profundidad de modulación 100%.....	43
4.1	Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación para la luz transmitida, para 5 potencias de entrada (mW): 0.25-a, 0.5-b, 1-c, 2-b, 3-d y una densidad óptica inicial normalizada de 10.....	48
4.2	Desfase fraccional como función de la frecuencia para una potencia fija, para diferentes densidades ópticas: 1.9-a, 3.8-b, 7.6-c.....	49
4.3	(a) Desfase fraccional y (b) amplitud relativa de la señal de fluorescencia como función de la frecuencia de modulación al inicio de la fibra.....	50
4.4	(a) Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación en la salida de la fibra, para potencias de entrada, 0.25-a, 0.5-b, 1-c, 2-d, 3-e. (b) Mismas dependencias que en el inciso (a), pero con la substracción de la respuesta de la señal de fluorescencia al inicio de la fibra. ....	50
4.5	Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación para una potencia normalizada de entrada de 2.5, para diferentes longitudes de propagación (también normalizadas, $\alpha_0 L$ ): 1.7, 3.3, 5.0, 6.7, 8.3, 10 (a-f). Las curvas fueron corregidas restando el desfase propio de la fluorescencia.....	51
5.1	Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación para tres potencias promedio de entrada: 1mW-círculos, 2mW-cuadros, 3 mW-triángulos. Para la simulación numérica se utilizó una potencia de saturación=0.18 mW y una densidad óptica=11.4.....	54
5.2	Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación, para tres potencias promedio de entrada. Densidad óptica:11.4 y potencia de saturación:0.15 mW.....	54

5.3	Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación, para tres potencias promedio de entrada. Densidad óptica:11.4 y potencia de saturación:0.25mW. ....	55
5.4	Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación, para tres potencias promedio de entrada. Densidad óptica:10 y potencia de saturación:0.2mW. ....	56
5.5	Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación, para tres potencias promedio de entrada. Densidad óptica: 13 y potencia de saturación:0.2mW. ....	56
5.6	Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación, para tres potencias promedio de entrada. Densidad óptica: 8.5 y potencia de saturación: 0.22 mW.....	56
5.7	Desfase fraccional (a) y Amplitud (b) de la señal de fluorescencia el inicio de la fibra como función de la frecuencia de modulación, para una potencia de entrada de 0.53 mW y una profundidad de modulación de 100 %.....	57
5.8	Desfase fraccional de la señal de fluorescencia como función de la frecuencia de modulación al final de la fibra, con una potencia de entrada de 0.53 mW y una profundidad de modulación del 100%. Para la consideración teórica se utilizó una densidad óptica de 11.4 y una potencia de saturación 0.2 mW. ....	58
5.9	Densidad óptica 11.4, potencia de saturación 0.2 mW.....	58
5.10	Densidad óptica 11.4, potencia de saturación 0.3 mW. ....	59
5.11	Densidad óptica 11.4, potencia de saturación 0.1 mW. ....	59
5.12	Densidad óptica 8.5, potencia de saturación 0.1 mW. ....	60

## ÍNDICE DE TABLAS

I. Conectores de fibra óptica, su acoplamiento y sus pérdidas. SM, fibra monomodo; MM, fibra multimodo.....	23
II. Parámetros de la fibra dopada con Erblio, HG980.....	27

# Introducción

Actualmente las fibras ópticas tienen muchas aplicaciones. En comunicaciones ópticas, se utilizan como medio de transmisión para las redes de telecomunicaciones. (Agrawal 2007). Se pueden utilizar también como sensores ópticos para medir parámetros tales como la tensión, la temperatura, la presión, entre otros. Hay fibras ópticas que son dopadas con tierras raras cuyas aplicaciones pueden ser amplificadores, láseres (Siegman, 1986) así como para el estudio de algunos efectos no lineales (como por ejemplo luz rápida/lenta),(Saleh 2007) .

Existen trabajos recientes (S. Melle, O.G. Calderón,2007; S.Stepanov y E. Hernandez,2008; A. Schweinsberg, N.N Lepeshkin,2006, G. M. Gehring,2006) en los cuales se ha observado la propagación de luz rápida/lenta en fibras dopadas con erbio.

En particular, la fibra dopada de Erblio (FDE) es un modelo flexible y prometedor para la investigación de la propagación de luz lenta / rápida (e incluso la velocidad de grupo negativa) en materiales con saturación óptica. Los experimentos se llevan a cabo en el rango espectral de 1480-1570 nm , rango de la absorción/ ganancia de los iones de Erblio y usando una potencia de entrada en una escala sub-mW.

La configuración experimental convencional (presentada en los trabajos previos) permite observar únicamente los perfiles de entrada y de salida del pulso. El estudio de los cambios espaciales en la forma y el retraso de los pulsos de luz a través de la longitud de la fibra pueden ser investigados por el "método destructivo", cortando la fibra. En este trabajo se presenta una técnica original, no destructiva, para observar la propagación espacial de los impulsos por medio de la fluorescencia transitoria que es excitada por pulsos de luz modulados.

Este trabajo se divide en 7 capítulos. En el capítulo 1, se presenta el marco teórico que servirá para entender todos los conceptos relacionados a la investigación. En el capítulo 2 se presenta y describe el

material y equipo que se utilizó en el trabajo experimental. El capítulo 3 presenta los resultados experimentales que fueron obtenidos en el laboratorio y el capítulo 4 describe una simulación numérica que aborda el problema que se estudió en el laboratorio. En el capítulo 5 se muestra la comparación de los datos experimentales con los datos obtenidos mediante la simulación numérica. Por último, en el capítulo 6, se presentan conclusiones del trabajo.

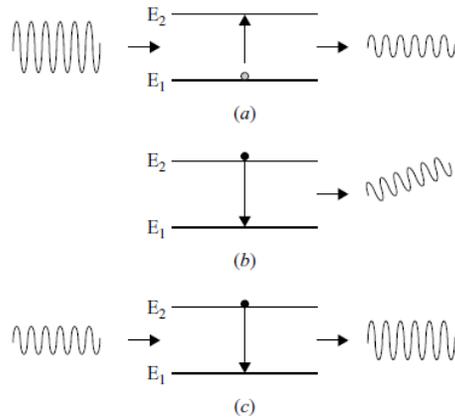
# Capítulo 1: Conceptos Básicos

## 1.1 Luz: dualidad de onda y partícula

La luz puede poseer propiedades de partícula y propiedades ondulatorias. La electrodinámica clásica sostiene la idea de una transferencia continua de energía por medio de ondas electromagnéticas. Por otro lado la electrodinámica cuántica describe las interacciones electromagnéticas y el transporte de energía en términos de “partículas” elementales sin masa, denominadas fotones. Uno de los principios básicos de la mecánica cuántica es que tanto la luz como las partículas materiales muestran unas propiedades similares a onda-partícula. Para la luz, se tiene una representación de la naturaleza ondulatoria en la forma de las ecuaciones del campo electromagnético clásico de Maxwell. (Hetch, 2000)

La doble naturaleza de la luz se pone de manifiesto por el hecho de que se propaga en el espacio como lo hace un onda, demostrando, sin embargo, un comportamiento de partícula durante los procesos de emisión y absorción, los cuales se describen a continuación. La energía radiante electromagnética es creada y destruida en cuantos o fotones. No obstante, su movimiento a través de una lente, un agujero o un conjunto de rendijas, está sujeto a sus características ondulatorias. (Hetch 2000)

Los átomos están caracterizados por niveles de energía discretos. Interactúan con la radiación electromagnética teniendo transiciones entre los niveles energéticos de tres maneras: absorción, emisión espontánea y emisión estimulada, como se muestra en la figura 1.1.



**Figura 1.1** Los átomos interactúan con la radiación de tres maneras: (a) absorción; (b) emisión espontánea; (c) emisión estimulada.

La absorción es cuando un átomo que se encuentra en el nivel energético base ( $E_1$ ), puede absorber radiación de frecuencia  $\nu_0$  y ser excitado hacia un nivel energético mayor ( $E_2$ ):

$$\nu_0 = \frac{E_2 - E_1}{h} , \quad (1)$$

donde  $h=6.634 \times 10^{-34}$  J-s, es la constante de Planck. Dado que los valores energéticos de los distintos niveles dependen del átomo, un átomo absorbe la luz de ciertas longitudes de onda únicamente, que corresponden a los diferentes pares de niveles de energía.

La emisión espontánea ocurre aleatoriamente cuando un átomo que ocupe un nivel de energía superior puede emitir radiación electromagnética espontáneamente con una fase y dirección aleatoria y ser des-excitado a un nivel energético menor, generando radiación monocromática incoherente. A estas emisiones se les conoce como fluorescencia.

La emisión estimulada se produce cuando un átomo en estado excitado recibe un estímulo externo que lo lleva a emitir fotones y así retornar a un estado menos excitado. El estímulo proviene de la llegada de un fotón con energía similar a la diferencia de energía entre los dos estados. Los fotones así emitidos por el átomo estimulado poseen fase, energía y dirección similares a las del fotón externo que les dio origen.

Cuando un sistema atómico está en equilibrio térmico, la mayoría de los átomos se encontrarán en el estado base (E1). Por lo que si la luz a una longitud de onda específica va a interactuar con esta colección de átomos, habrá más átomos que absorberán la radiación que los que tendrán una emisión estimulada, la luz sufrirá atenuación. Por otro lado si el número de átomos es mayor en el nivel energético más alto, que en uno de menor energía (efecto conocido como la inversión de población), la luz incidente a una longitud de onda apropiada inducirá mas emisiones estimuladas que absorciones de fotones. Este efecto llevará a una amplificación de la señal.

## 1.2 Velocidad de fase y velocidad de grupo

Ahora se considera una onda monocromática plana, con frecuencia angular  $\omega$  que se propaga en un medio de índice de refracción  $n$ . La onda se puede escribir de la siguiente manera:

$$E(z,t) = Ae^{i(kz - \omega t)} + c.c , \quad (2)$$

donde  $k = n\omega / c$ , es el número de onda. La velocidad de fase,  $v_f$ , es la velocidad a la cual un punto de la fase constante, se mueve a través del medio. Dado que la fase de la onda está dada por:

$$\phi = kz - \omega t , \quad (3)$$

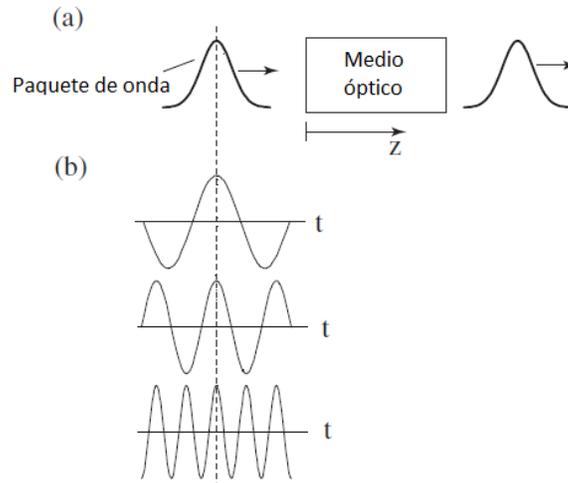
los puntos de la fase constante se desplazan una distancia  $\Delta z$  en un tiempo  $\Delta t$ :

$$k\Delta z = \omega\Delta t . \quad (4)$$

Por lo tanto,  $v_f = \Delta z / \Delta t$  ó

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{n} . \quad (5)$$

Consideremos ahora, la propagación de un pulso a través de un material. Un pulso es un paquete de onda conformado por un conjunto de frecuencias, como se muestra en la figura 1.2.



**Figura 1.2.** Representación esquemática de un pulso óptico en términos de varias componentes espectrales.

Si este pulso se propaga sin distorsión, las componentes de Fourier deben sumar en fase para todos los valores a lo largo de la propagación en la dirección z. A la velocidad con la que se propaga el pulso, o la envolvente, se le conoce como velocidad de grupo.

Reescribimos la fase de la onda de la siguiente manera:

$$\phi = \frac{nwz}{c} - \omega t, \quad (6)$$

dado que la fase es constante,  $d\phi/d\omega = 0$ , ó

$$\frac{dn}{d\omega} \frac{\omega z}{c} + \frac{nz}{c} - t = 0, \quad (7)$$

en donde  $z = v_g t$ , la velocidad de grupo  $v_g$ , está dada por la siguiente ecuación:

$$v_g = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}} = \frac{d\omega}{dk}. \quad (8)$$

Esta última expresión se puede reescribir en términos del índice de grupo  $n_g$ :

$$v_g = \frac{c}{n_g}, \quad (9)$$

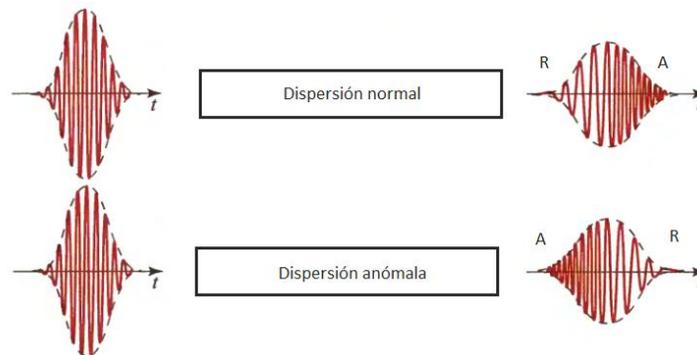
en donde el índice de grupo está dado por la siguiente relación:

$$n_g = n + \omega \frac{dn}{d\omega} . \quad (10)$$

### 1.3 Propagación de un pulso en un medio dispersivo

Un medio dispersivo se caracteriza por un índice de refracción dependiente de la frecuencia y el coeficiente de absorción, por lo que las ondas monocromáticas de diferentes frecuencias que viajan a través del medio con diferentes velocidades y se someten a diferentes atenuaciones. (Saleh, 2007).

Existen dos efectos que se conocen como dispersión normal y anómala, que se muestra en la figura 1.3. La dispersión normal es cuando el tiempo de viaje para las componentes de frecuencias altas es mayor que el tiempo para las componentes de baja frecuencia. Esto implica que las componentes de menor longitud de onda del pulso llegan después de las componentes de mayor longitud de onda. Para la dispersión anómala el comportamiento es viceversa.



**Figura 1.3.** Propagación de un pulso óptico a través de un medio con dispersión normal y anómala. En el medio de dispersión normal, las componentes del pulso que conforman las longitudes de onda más cortas (A), llegan después que las de longitudes de onda más largas (R). Para la dispersión anómala, el comportamiento es al revés. Se dice que el pulso tiene un barrido.

En un medio dispersivo, la ecuación de onda para una frecuencia está dada por (D. Griffiths, 1999):

$$\nabla^2 \tilde{\mathbf{E}} = \tilde{\epsilon} \mu_0 \frac{\partial^2 \tilde{\mathbf{E}}}{\partial t^2} , \quad (11)$$

y tiene como solución una ecuación de onda plana de la siguiente forma:

$$\tilde{\mathbf{E}}(z, t) = \tilde{\mathbf{E}}_0 e^{i(\tilde{k}z - \omega t)}, \quad (12)$$

con el número de onda complejo:

$$\tilde{k} \equiv \sqrt{\tilde{\epsilon} \mu_0} \omega. \quad (13)$$

Escribiendo a  $\tilde{k}$  en términos de parte real e imaginaria:

$$\tilde{k} = k + i\kappa. \quad (14)$$

La ecuación 12 se puede reescribir como:

$$\tilde{\mathbf{E}}(z, t) = \tilde{\mathbf{E}}_0 e^{-\kappa z} e^{i(kz - \omega t)}. \quad (15)$$

Se puede notar que la onda es atenuada, por el término exponencial negativo. Dado que la intensidad es proporcional a  $E^2$  (y por lo tanto a  $e^{-2\kappa z}$ ), la cantidad,

$$\alpha \equiv 2\kappa, \quad (16)$$

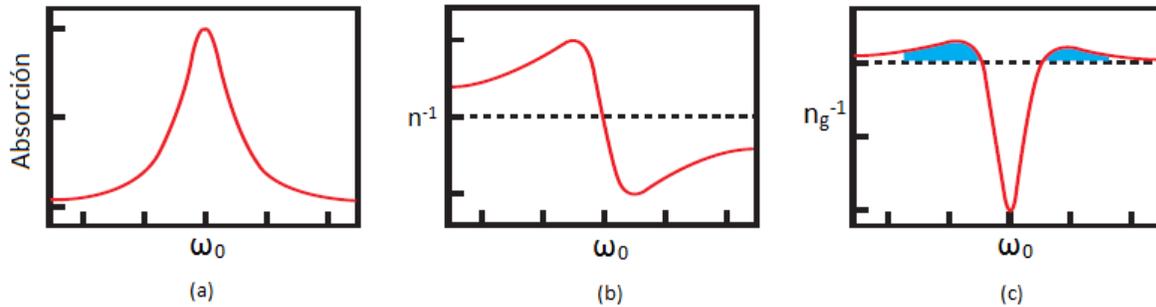
es conocida como el “coeficiente de absorción” que depende de la parte imaginaria de  $k$ . Por otro lado la velocidad de la onda es  $\omega/k$ , y el índice de refracción es entonces:

$$n = \frac{ck}{\omega}. \quad (17)$$

Estas últimas dos ecuaciones están relacionadas entre sí, por el número complejo  $k$ . De esta manera se puede utilizar las relaciones de Kramers-Kronig, que describen la relación que existe entre la parte real y la parte imaginaria de ciertas funciones complejas.

En la figura 1.4 se muestra la gráfica del coeficiente de absorción (4-a), el índice de refracción (4-b) y el índice de grupo (4-c) en la vecindad de resonancia. En la cercanía de la frecuencia de resonancia el coeficiente de absorción tiene un aumento muy grande en un rango pequeño de frecuencias y como consecuencia, el índice de refracción tiene un cambio brusco. La velocidad de grupo puede ser entonces mayor o menor que la velocidad de la luz en el vacío ( $c_0$ ). Existen casos de la luz lenta, en donde la

velocidad de grupo puede ser muy pequeña e incluso detenerse. El pulso también puede viajar a velocidades de grupo negativas. Esto significa que un punto del pulso llega al final del medio antes de que éste entre dicho medio. Cabe señalar que en ninguno de estos casos la velocidad de información excede  $c_0$ .



**Figura 1.4.** En un sistema de dos niveles, el aumento de la absorción (a) en la vecindad de la resonancia, da lugar a un cambio brusco del índice de refracción (b). Luz lenta se obtiene cuando el  $n_g$  es grande y positivo, indicado por la parte sombreada de la figura (c).

## 1.4 Ecuaciones de razón para un sistema de dos niveles.

A continuación se describirá un sistema de dos niveles  $N_1$  y  $N_2$ . La población de estado base se tomará como  $N_1$ , y la población del estado metaestable  $N_2$ . De modo que la suma de la población de los dos niveles será igual a la concentración total de las población;  $N_0 = N_1 + N_2$ .

La ecuación de propagación de una potencia  $P$  de luz, con frecuencia resonante a través del medio con la población  $N_1$  del estado base es la siguiente:

$$\frac{dP}{dz} = P\sigma_{21}N_2 - P\sigma_{12}N_1, \quad (18)$$

donde,  $z$  es la distancia a lo largo de la fibra,  $N_2$  es la población del nivel metaestable,  $\sigma_{21}$  es la sección transversal de emisión,  $\sigma_{12}$  es la sección transversal de la absorción. La ecuación 18 refleja el cambio de la potencia a lo largo de la fibra. El primer término de lado derecho después de la igualdad, corresponde

a la transición inducida cuando se observa el paso del ion al estado base (con irradiación de un fotón). El segundo término indica la absorción de la potencia transmitida. El signo negativo viene dado por que la luz es absorbida y por lo tanto la potencia de la luz disminuye.

La ecuación de razón para la población del nivel energético base del ion puede ser presentada como:

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{N_2}{\tau} + \frac{P\sigma_{21}}{\hbar\omega A} N_2 - \frac{P\sigma_{12}}{\hbar\omega A} N_1, \quad (19)$$

donde,  $\tau$  es el tiempo de relajación espontánea del nivel metaestable,  $A$  es el área modal de la fibra,  $\omega$  es la frecuencia de transición de los iones entre el estado base y el metaestable. El primer término en lado derecho después de la igualdad, indica la irradiación de los fotones debida a la relajación espontánea. Dado que esto implica un aumento de la población en el estado base, el signo de este término es positivo. El segundo término corresponde al proceso cuando el ion regresa al estado 1 por la transición estimulada. El último término corresponde a la absorción del fotón acompañado por la transición del ion al estado metaestable y por ello el signo negativo.

En el estado de la iluminación estacionaria, cuando ya no hay cambios temporales, el término izquierdo en la ecuación 19 es igual a cero,  $dN_1/dt = 0$ ,

$$\frac{N_2}{\tau} + \frac{P\sigma_{21}}{\hbar\omega A} N_2 - \frac{P\sigma_{12}}{\hbar\omega A} N_1 = 0. \quad (20)$$

Factorizando y agrupando:

$$N_2 \left( 1 + P \cdot \frac{\tau(\sigma_{21} + \sigma_{12})}{\hbar\omega A} \right) = \frac{\tau P N_1 \sigma_{12}}{\hbar\omega A}, \quad (21)$$

donde

$$P_{sat} = \frac{\hbar\omega A}{\tau(\sigma_{21} + \sigma_{12})} \quad (22)$$

y

$$\alpha_0 = \sigma_{12} N_0, \quad (23)$$

son la potencia de saturación y el coeficiente de absorción inicial ( es decir, no saturada)

respectivamente. Despejando  $N_2$  de la ecuación 21:

$$N_2 = \frac{\alpha_0 \tau P / \hbar\omega A}{1 + P / P_{sat}}. \quad (24)$$

Reescribiendo la ecuación 18; sustituyendo  $\alpha_0$  y  $N_2$  se obtiene:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{P\alpha_0 P / P_{sat}}{1 + P / P_{sat}} - P\alpha_0 \quad (25)$$

Si se denomina  $\hat{P}_0 = \frac{P}{P_{sat}}$ , como razón entre la potencia promedio del láser y la potencia de

saturación, la ecuación 25 se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\frac{d\hat{P}_0}{dz} = \frac{\hat{P}_0^2 \alpha_0}{1 + \hat{P}_0} - \hat{P}_0 \alpha_0 = -\frac{\alpha_0 \hat{P}_0}{1 + \hat{P}_0}. \quad (26)$$

Se llegó a una ecuación de propagación de la señal de la potencia promedio  $P_0$  a través de la fibra con saturación:

$$\frac{\partial \hat{P}_0}{\partial z} = -\frac{\alpha_0 \hat{P}_0}{1 + \hat{P}_0}. \quad (27)$$

### 1.4.1 Saturación de absorción óptica en sistemas de dos niveles

A continuación se plantean las ecuaciones para un medio saturable. Este fenómeno se puede dar únicamente en un sistema de dos niveles, en donde la probabilidad de que el electrón absorba un fotón o que tenga una emisión espontánea es igual para ambos casos. La saturación de absorción se da cuando la proporción de los electrones es cercana a 50/50. En este caso el medio se vuelve “transparente”, y pareciera que la luz pasa sin que los fotones se absorban o produzcan emisión espontánea.

Se reescribe la ecuación 19, en términos de intensidades:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \frac{-I\sigma_{12}N_1}{\hbar\omega} + \frac{I\sigma_{21}}{\hbar\omega}(N_0 + N_1) + \frac{(N_0 - N_1)}{\tau} . \quad (28)$$

La intensidad de saturación se define por la siguiente ecuación:

$$I_{sat} = \frac{\hbar\omega}{2\sigma_{12}\tau} . \quad (29)$$

El tiempo de relajación del ión erbio excitado es:

$$\tau_r = \tau \left( \frac{I}{I_{sat}} + 1 \right)^{-1} . \quad (30)$$

Para el caso en que la fibra óptica se encuentra saturada, el coeficiente de absorción se comporta de la siguiente manera:

$$\alpha = \sigma_{12} \Delta N = \frac{\sigma_{12} N}{I/I_{sat} + 1}, \quad (31)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{I/I_{sat} + 1}, \quad (32)$$

donde  $\alpha_0 = \sigma_{12} N$ , es un coeficiente de absorción inicial de la fibra (sin saturación).

Se puede escribir la ecuación 32, en término de potencias:

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + P/P_{sat}}, \quad (33)$$

en donde  $P$  es la potencia transmitida y  $P_{sat}$  está dada por la ecuación 22.

## 1.5 Fibras ópticas

La idea de utilizar la luz como soporte para una transmisión fue realizada por Alexander Graham Bell, en el año 1880. Sin embargo no fue hasta los principios de la década de los 70's, que esa idea se pudo llevar a cabo con la fabricación de fibras ópticas de buena calidad, con una atenuación muy baja, 0.2 dB/Km (1979).

Actualmente las fibras ópticas tienen muchas aplicaciones. En comunicaciones ópticas, se utilizan como medio de transmisión para las redes de telecomunicaciones. (Agrawal 2007). Se pueden utilizar como sensores ópticos para medir parámetros como la tensión, la temperatura, la presión, entre otros. Existen fibras ópticas que son dopadas con tierras raras cuyas aplicaciones pueden ser amplificadores, láseres (Siegman, 1986) y para el estudio de algunos efectos no lineales (como por ejemplo luz rápida/lenta),(Saleh 2007).

Una fibra óptica es una guía de onda dieléctrica hecha de un material de bajas pérdidas, como el vidrio de sílice. Tiene un núcleo, en el cual la luz es guiada, el cual está cubierto por un revestimiento de un índice de refracción ligeramente menor al núcleo. Los rayos de luz que inciden en el interface núcleo-cubierto con ángulos mayores que el ángulo crítico, tienen una reflexión total interna y es guiada a través del núcleo sin refracción hacia el revestimiento. (Saleh 2007) El ángulo crítico está dado por la siguiente ecuación:

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (34)$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son el índice de refracción del núcleo y del revestimiento respectivamente.

La luz se propaga en forma de modos. Un modo son las diferentes trayectorias que puede seguir un haz de luz en el interior de una fibra. Cada modo viaja a lo largo del eje del guía de onda con una constante de propagación y velocidad de grupo diferente. Cuando el diámetro del núcleo es pequeño, únicamente puede existir un modo, de forma que la fibra se caracteriza como mono-modo. Las fibras con un núcleo mayor se caracterizan como multimodales. Las fibras multimodo se usan en aplicaciones de corta distancia, menores a 1 km, mientras que las fibras monomodo se utilizan comúnmente en comunicaciones ópticas a distancias mucho mayores.

Existe otra clasificación de fibras; fibras de índice gradiente y fibras de índice de escalón. Para el primer caso el índice de refracción es máximo en el centro y va disminuyendo gradualmente hacia el revestimiento.

Por otro lado las fibras de índice de escalón tienen un índice de refracción  $n_1$  en el núcleo y  $n_2$  en el revestimiento, de radio  $a$  y  $b$  respectivamente. Los diámetros estándar del núcleo y el cubierto son  $2a/2b=8/125,50/125,62.5/125,85/125$  y  $100/140$  ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ). Los índices de refracción del núcleo y

revestimiento difieren muy poco, por lo que el cambio en el índice de refracción fraccional es muy pequeño [Saleh ,2007]:

$$\Delta \equiv \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \ll 1. \quad (35)$$

La mayoría de las fibras que se utilizan en sistema de comunicaciones ópticas están hechas de vidrio de sílice (SiO<sub>2</sub>). Pequeños cambios en índice de refracción se puede obtener agregando pequeñas concentraciones de materiales dopantes. Los índices  $n_1$  van de 1.44 hasta 1.46, dependiendo de la longitud de onda, y  $\Delta$  va de 0.001 y 0.02.

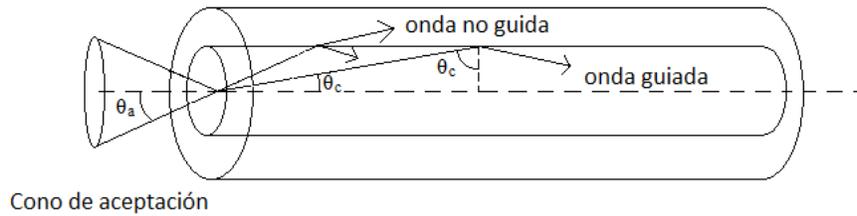
Existe un parámetro muy importante para la descripción de las fibras ópticas, la apertura numérica. Ésta describe la capacidad para capturar luz en una fibra. Un rayo incidente del aire en la fibra se convierte en un rayo guiado si, la refracción en el núcleo, que forma un ángulo con el eje de la fibra que es más pequeño que el ángulo crítico. Como se muestra en la figura 4, si se aplica la ley de Snell en la vecindad de aire-núcleo, el ángulo  $\theta_a$  en el aire que corresponde al  $\theta_c$  es (Saleh, 2007):

$$\theta_a = \sin^{-1} NA. \quad (36)$$

La apertura numérica (NA) está dada por la siguiente ecuación:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}. \quad (37)$$

El ángulo de aceptación  $\theta_a$ , de la fibra determina el cono de los rayos externos que son guiados por la fibra. Para rayos incidentes con ángulos mayores al ángulo de aceptación son refractados en la fibra pero son guiados por distancias cortas ya que no experimentan reflexión total interna.

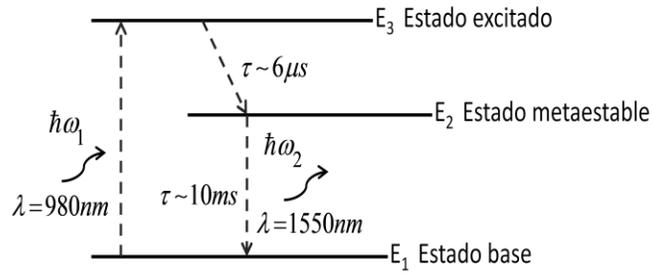


**Figura 1.5.** El ángulo de aceptación de la fibra ( $\theta_a$ ). Los rayos de luz que estén dentro del cono de aceptación, serán guiados por la reflexión total interna. Fibras con valores de NA grandes tienen mayor capacidad de captar luz que las fibras con NA menor.

### 1.5.1 Fibras dopadas con erbio

Las fibras ópticas de silicio muchas veces son fabricadas con distintos contaminantes, para distintas aplicaciones. Uno de los contaminantes es el Erblio (Er), el cual es un elemento químico pertenece a los metales del grupo de tierras raras. Entra el silicio en la forma trivalente  $Er^{3+}$  y es ampliamente usado como medio activo en amplificadores ópticos y láseres de fibra óptica (Becker, Thyagarajan K., Ajoy Ghatak, 2007).

La figura 3 muestra el sistema de tres niveles energéticos de los iones de erbio dentro del vidrio de sílice. Al bombear la fibra con una longitud de onda de 980nm, los iones de erbio absorben los fotones y son elevados al estado excitado ( $E_3$ ), de donde decaen al nivel metaestable ( $E_2$ ) después de un tiempo característico de  $\sim 6\mu s$  a través de una transición no radiactiva. En el estado metaestable, los iones tienen un tiempo de vida de  $\sim 10ms$ , después de lo cual regresan al estado base por la emisión espontánea. Después de un tiempo habrá una inversión de población como consecuencia del bombeo. Si la fibra se ilumina con una longitud de onda de 1550nm, ésta causará la emisión estimulada de luz con la misma longitud de onda, fase y dirección como la señal incidente. A este efecto se le conoce como amplificación de la luz.



**Figura 1.6.** Sistema energético de tres niveles de los iones de erbio, en vidrio de sílice. El láser de bombeo a 980 nm excita los iones de erbio del estado energético  $E_1$  al  $E_3$ , que después de  $6 \mu s$  tienen una transición al nivel metaestable,  $E_2$ . La inversión de población entre el estado  $E_1$  y  $E_2$  es responsable de la amplificación de la señal a una longitud de onda de 1550nm.

Como ya se mencionó anteriormente, las fibras dopadas con iones de Erblio se utilizan principalmente en amplificadores ópticos, y cuyo funcionamiento está basado en la emisión estimulada. Los amplificadores ópticos fueron diseñados para superar la atenuación de la señal que viaja en las fibras ópticas y proporcionan una ganancia de la señal (que es la razón entre la potencia de salida y la potencia de entrada). Sólo un cierto rango de frecuencias (conocido como ancho de banda de ganancia) pueden ser amplificadas por un dispositivo en particular. Todos los amplificadores tienen un límite en la potencia de salida; aumentando la potencia de entrada, no se aumentará la potencia de salida, a este efecto se le conoce como ganancia de saturación. Existen dos tipos de amplificadores ópticos: los semiconductores (cuyo medio de ganancia es bombeado eléctricamente) y los amplificadores de fibra óptica dopadas con tierras raras (en los cuales la ganancia es proporcionada por bombeo óptico a la fibra).

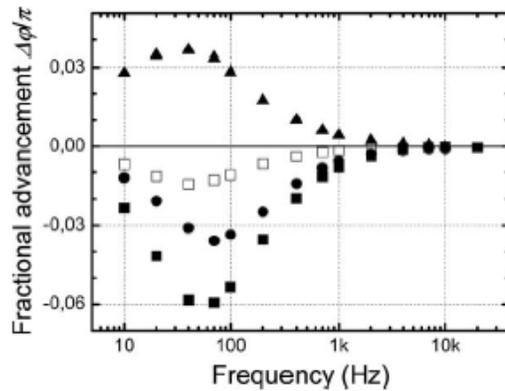
Dopando la fibra con diferentes tierras raras, como erbio (Er), neodimio (Nd) o praseodimio (Pd), significa que se debe de operar en diferentes longitudes de onda. Las fibras dopadas con erbio trabajan con 1.55 micrones. En comunicaciones a largas distancias suelen utilizar longitudes de onda cercanas a 1.55 micras. Además, la longitud de onda con la cual la fibra de vidrio sufre la mínima atenuación es

alrededor de  $1.5\mu\text{m}$ , por lo que los amplificadores de fibra dopados con erbio (EDFA) son más útiles para aplicaciones de comunicaciones a larga distancia.

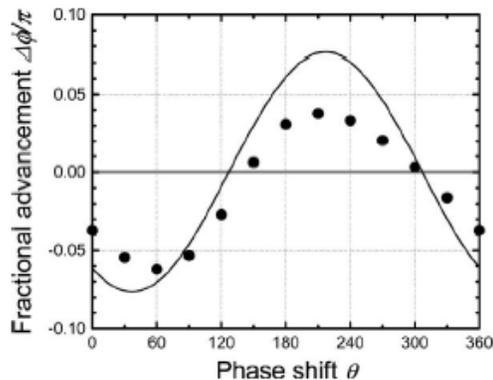
Por otro lado, las fibras dopadas con erbio también han sido utilizadas para el estudio de algunos efectos no lineales. Según trabajos recientes (S. Melle, O.G. Calderón,2007; S.Stepanov y E. Hernandez,2008; A. Schweinsberg, N.N Lepeshkin,2006; ", G. M. Gehring,2006) se ha observado la propagación de luz rápida/lenta en fibras dopadas con erbio. Dado que estas fibras son medios saturables, han sido un buen candidato para dicho estudio:

En el trabajo de Sonia Melle (2007), se estudió la propagación de luz lenta en fibras dopadas con erbio en diferentes concentraciones de los iones de erbio (desde 880 ppm hasta 4350ppm). Se encontró que el retraso fraccional aumenta con el incremento de la densidad de los iones. Se encontró también una saturación en el retraso fraccional para fibras con densidades de los iones de erbio por encima de 3150 ppm. Las fibras más dopadas pueden simultáneamente incrementar el retraso fraccional y el ancho de banda de la señal.

Estudio similar fue realizado por S.Stepanov y E. Hernandez. En este trabajo se observó tanto la propagación de luz rápida como de luz lenta. Se utilizó dos señales moduladas sinusoidalmente que se propagaron en direcciones contrarias, sin bombeo óptico. Una señal se utilizó para la saturación de la absorción de la fibra, mientras que la segunda como señal de prueba y cuya potencia era mucho menor a la de saturación. El avance/retraso dependía de la frecuencia de modulación, como se muestra en la figura 6. El efecto de retraso/avance fraccional crece con la absorción óptica de la fibra en la señal de prueba y el efecto puede ser mucho mayor que en la señal de saturación. La señal de prueba tuvo un adelanto en el caso cuando las dos señales fueron moduladas en anti fase, como se muestra en la figura 1.7.

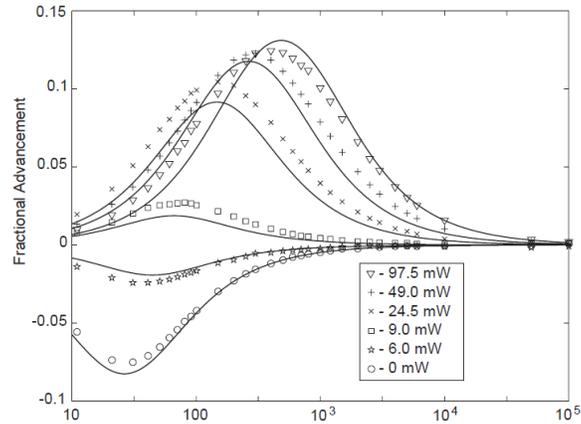


**Figura 1.7.** Avance fraccional de las señales de saturación/prueba con  $\lambda_s=1568$  nm (cuadros vacíos) y  $\lambda_p=1526$  nm (cuadros rellenos) a una potencia promedio de entrada de 2 y 0.5 mW respectivamente. Los círculos y triángulos, presentan el avance fraccional inducido por la señal modulada de saturación a 1268nm en la señal de prueba para modulación en fase y anti-fase respectivamente.



**Figura 1.8.** Avance fraccional observado en la señal de prueba como función del ángulo de fase entre las señales de prueba y saturación. ( $\lambda_s=1568$  nm,  $P_s=2$ mW nm y  $\lambda_s=1526$  nm  $P_s=0.5$ mW). La línea continua es un ajuste teórico.

Por otro lado se han realizado estudios de la propagación de luz rápida /lenta utilizando bombeo óptico en fibras dopadas con erbio (A. Schweinsberg, N.N Lepeshkin 2006). En su trabajo, la fibra fue bombeada a una longitud de onda de 980nm a diferentes potencias. Se utilizaron con dos señales de prueba por separado; la primera fue modulada sinusoidalmente y la segunda era una señal gaussiana. Se encontró una dependencia del retraso o avance de la señal con la potencia de la luz de bombeo para ambas señales, como se muestra en la figura 1.9.



**Figura 1.9.** Dependencia de la frecuencia y de la potencia de bombeo observada en la propagación a través de fibra dopada de erbio. La señal de entrada fue modulada sinusoidalmente cuya longitud de onda era 1550nm y una potencia promedio de 0.8 mW. Los puntos son datos experimentales y las líneas continuas son ajustes teóricos. Las diferentes curvas representan diferentes potencias de bombeo.

El grupo de investigación de George M. Gehring (2006), estudió la propagación de pulsos a través de un material con un valor negativo de la velocidad de grupo. Utilizaron una fibra óptica dopada de erbio que fue bombeada con una longitud de onda de 980 nm y cuya intensidad fue modulada sinusoidalmente. Se mandó un pulso de “prueba” gaussiano de una longitud de onda de 1550nm. Se midió el cambio de la intensidad con el tiempo en diferentes puntos de la fibra y se observó que el máximo del pulso se propaga hacia “atrás” dentro de la fibra, lo que significa que la velocidad de grupo era negativa. Se observó también que la energía fluyó siempre hacia adelante.

El hecho de poder controlar el retraso de pulsos ha generado la motivación de estas y muchas otras investigaciones ya que tienen aplicaciones prometedoras. Entre algunas de las posibles aplicaciones se pueden mencionar: el almacenamiento óptico de información (“optical buffering”), sincronización de tiempo (“clock recovering”) y procesamiento de señales (T.K Krauss, 2008).

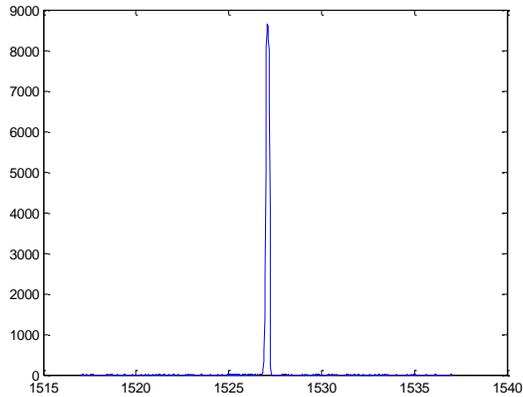
# Capítulo 2. Equipo y materiales

## 2.1 Láser

Un láser es un dispositivo que genera o amplifica radiación coherente en diferentes frecuencias del espectro electromagnético y cuyo funcionamiento está basado en la amplificación de la emisión estimulada de radiación. (Siegman, 1986).

El funcionamiento del láser es el siguiente: Un medio activo (sea de átomos, moléculas, iones o algún cristal semiconductor) es bombeado para excitar a los átomos (moléculas, etc.) y obtener así una inversión de población, que a su vez produce una radiación coherente en un rango de frecuencias muy pequeño. El medio activo se encuentra entre dos espejos, uno 100% reflector y el otro parcialmente reflector, que hacen que la radiación esté retroalimentándose y amplificando. Se obtiene entonces una oscilación coherente que al tener la potencia suficiente saldrá por el espejo parcialmente reflector, obteniendo “luz láser”.

Para este trabajo se utilizó un láser semiconductor (diodo láser) de onda continua de tipo DFB, por sus siglas en inglés “distributed feedback” de la marca NTT electronics, modelo NLK1556STG SN 011258, que emite una longitud de onda de  $\lambda = 1526 \text{ nm}$ , y su potencia de salida es de 20 mW. El diodo láser está montado a una base tipo mariposa y a su vez está conectado a un driver de corriente (Thorlabs, modelo LCD 202B). Éste es una fuente de corriente externa cuya función es el bombeo del diodo láser y cuya corriente umbral es de  $I_u \geq 11 \text{ mA}$ . A continuación se presenta el espectro de emisión del láser medido experimentalmente con un analizador de espectros.



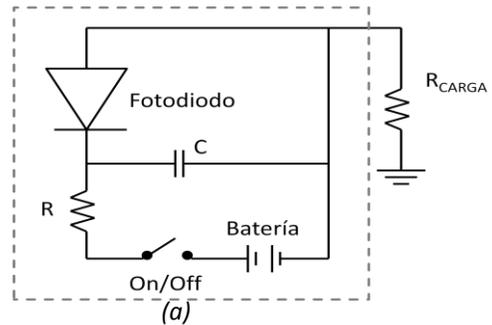
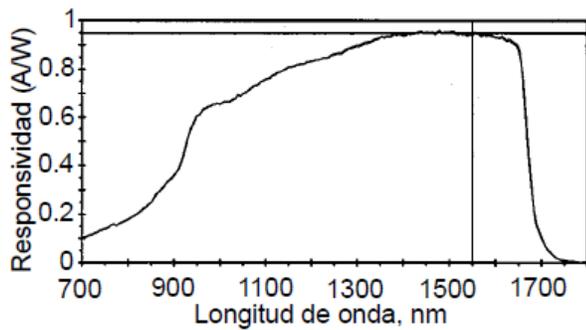
**Figura 2.1.** Espectro de emisión del láser. El pico de emisión se da en una longitud de onda de 1526nm.

## 2.2 Fotodetector

Todos los resultados obtenidos en el trabajo están basados en mediciones de la variación de la potencia de luz. Para esto se utilizó un fotodetector que es un traductor de luz que proporciona una señal eléctrica como respuesta a la radiación óptica que incide sobre la superficie sensora.

Se utilizó un fotodetector de Thorlabs- DET410, tiene un conector FC y un fotodiodo de InGaAs. Tiene una respuesta espectral en un rango de 700 a 1800, una responsividad de 0.95 A/W que corresponde a la longitud de onda de 1526 nm (figura 2.2-a), un tiempo de respuesta de 5 ns y un área sensible de  $\approx 0.8\text{mm}^2$ .

El circuito eléctrico interno se presenta en la figura 2.2-b. Tiene una pila de 12 V y una resistencia de carga variable. Se utilizaron resistencias de carga de 1 y 1.083 k $\Omega$ . Para mediciones de potencias bajas, se utilizó una resistencia de 10 k $\Omega$ , para aumentar la sensibilidad del fotodetector. La resistencia interna es de 1 k $\Omega$ , por lo que no se puede utilizar estos fotodiodos para mediciones de potencias ópticas mayores de 10mW ya que a potencias mayores el fotodiodo se satura.



(b)

Figura 2.2. Curva de responsividad (a) y circuito eléctrico interno (b) del fotodetector DET410 de Thorlabs.

## 2.3 Elementos de la fibra óptica

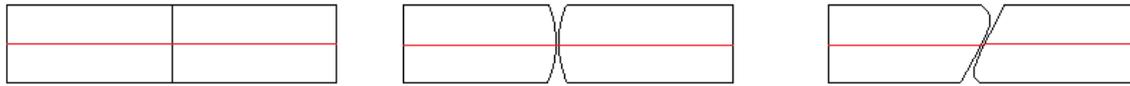
### 2.3.1 Conectores

Existen varios tipos de conectores, para unir fibras ópticas. A continuación se presenta una tabla con los conectores más frecuentes.

Conector	Acoplamiento	Tipo de fibra óptica	Pérdidas Conectores
ST	Bayoneta	SM y MM	0.30 SM-0.40 MM
SMA	Rosca	MM	0.60 MM
FC/PC	Guía+Rosca	SM y MM	0.20 SM-0.15MM
SC	Push-Pull	SM y MM	0.20 SM-0.15 MM

Tabla I. Conectores de fibra óptica, su acoplamiento y sus pérdidas. SM, fibra monomodo; MM, fibra multimodo.

También existen varios tipos de pulidos/contactos entre los extremos de las férulas de los conectores:



(a)

(b)

(c)

**Figura 2.3.** Tipos de contactos entre los extremos de férulas de los conectores; plano**(a)**, PC/SPC **(b)**, APC **(c)**

Durante el trabajo se utilizaron únicamente detectores FC/PC.

### 2.3.2 Acoplador

Un acoplador óptico es un dispositivo que divide un haz de luz en diferentes caminos ópticos. El acoplador que se utilizó era uno de razón 90/10.

### 2.3.3 Atenuador óptico variable

Un atenuador óptico es un dispositivo que permite variar la potencia de la luz. Para este trabajo se utilizó el atenuador 74950-1 de Oz Optics.

### 2.3.4 Aislador

Un aislador es un dispositivo que deja pasar la luz en una sola dirección y bloquea el paso de luz en sentido inverso impidiendo que afecte a otros dispositivos. Se utilizó un aislador de la marca AFW (Australian Fiber Works), con la finalidad de evitar que la luz se regrese al diodo láser y produzca una condición de resonancia que pueda dañarlo.

## **2.4 Equipo electrónico**

### **2.4.1 Analizador de espectros**

Un analizador de espectros es un equipo de medición electrónica que permite visualizar en una pantalla las componentes espectrales de una señal óptica de entrada (también puede ser de onda eléctrica o acústica), en su espectro de frecuencias o longitudes de onda.

El analizador de espectros utilizado para este trabajo fue de la marca Hawlett Packard, modelo HP70951A. Su rango espectral es de 600-1700nm, resolución espectral es de hasta 0.1nm y una sensibilidad máxima de hasta -85dBm.

### **2.4.2 Osciloscopio**

Un osciloscopio es un instrumento de medición electrónico para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar en el tiempo. El osciloscopio que se utilizó fue de la marca Le croy, modelo 422. Tiene dos canales de entrada, su ancho de banda es de 200 MHz, muestrea hasta una velocidad de 2GS/s, y sensibilidad desde 1mV/div hasta 10V/div.

### **2.4.3 Generador de funciones**

Es un aparato electrónico que produce señales de ondas de varios tipos a frecuencia y amplitud variable. Genera ondas de varios tipos, senoidal, triangular, cuadrada, diente de sierra entre otros. El generador de funciones que se utilizó es de la marca Stanford Research System, modelo DS335. Su amplitud máxima es de 20 Vpp y su ancho de banda es de 3 MHz.

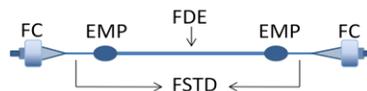
#### 2.4.4 Amplificador Lock-in

Los amplificadores Lock-in son utilizados para detectar y medir señales muy pequeñas de CA. Se pueden lograr mediciones muy precisas aun cuando la señal se encuentre en presencia de fuentes de ruido externas. Estos amplificadores usan una técnica conocida como detección sensible a la fase para separar la componente de la señal a una fase y frecuencia de referencia específicas. Las señales de ruido con frecuencias que difieren de la frecuencia de referencia son rechazadas. Se utilizó un Lock-in de la marca Stanford Research System, modelo SR850 DSP. Tiene un rango de detección de frecuencias de 1mHz a 102 kHz, con impedancia de entrada de  $10\text{ M}\Omega + 25\text{ pF}$  (acoplamiento AC o DC), una sensibilidad de 2nV a 1V y una resolución de fase de 0.001 grados.

#### 2.5 Fibras dopadas con Erblio.

Se utilizó una fibra dopada con erbio HG980 de 3 metros, del proveedor "OFS Fitel". Es una fibra comercial y diseñada principalmente para aplicaciones en sistemas de telecomunicaciones ópticas.

Esta fibra está empalmada en cada uno de sus extremos a una fibra estándar tipo SMF28 y terminadas con conectores FC (como se muestra en la figura 2.4).



**Figura 2.4.** Conectores y empalmes de la fibra HG980. FC, conectores; FDE, fibra dopada con erbio; EMP, empalme; FSTD, fibra estándar SMF28.

Los parámetros de la fibra dadas por el proveedor están presentadas en la tabla II.

Parámetro	EDF-HF980
Absorción pico @ 1530nm	17.1 dB/m
Absorción pico @ 980nm	14.1 dB/m
Concentración de Erblio estimada	$2.65 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$
Longitud de onda de corte	820 nm
Diámetro del campo modal	$4.4 \pm 0.8 \mu\text{m}$
Diámetro del núcleo	$2 \mu\text{m} \pm 5\%$
Diámetro de la cubierta	$125 \pm 2 \mu\text{m}$
Diámetro de la capa	$250 \pm 10 \mu\text{m}$
Codopantes	Ge/Al
Abertura Numérica	$0.29 \pm 0.004$

**Tabla II.** Parámetros de la fibra dopada con Erblio, HG980.

Además de las características proporcionadas por el proveedor, fue necesario conocer otros parámetros importantes de la fibra como lo es la potencia de saturación  $P_{sat}$ , y la densidad óptica de la fibra sin saturación  $\alpha_0 L$ . Estos parámetros se determinaron experimentalmente como se describe a continuación.

### 2.5.1 Cálculo experimental de la potencia de saturación

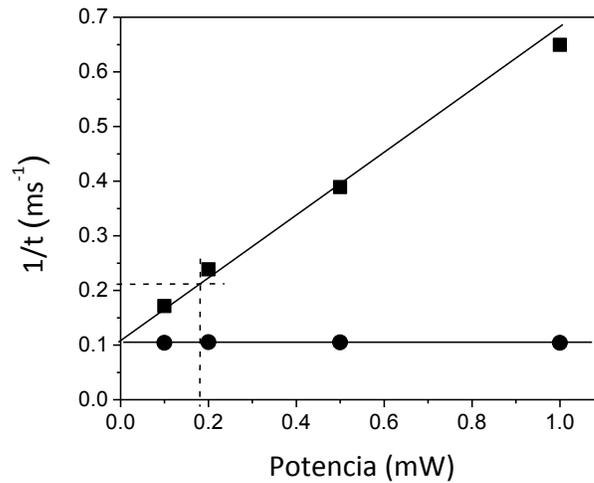
Para calcular la potencia de saturación se utilizó el método de fluorescencia transitoria. Con un generador de funciones, se moduló la intensidad de la luz utilizando un patrón rectangular con una profundidad de modulación del 100% y una frecuencia de 13 Hz. Se tomaron mediciones de la señal de fluorescencia a 5cm de la fibra dopada con erbio para 9 potencias de entrada (entre 0.05 y 1.4 mW). Las señales de fluorescencia se observaron en el osciloscopio.

El tiempo de excitación y relajación, se obtuvo mediante un ajuste exponencial de señal utilizando Origin 8, para cada potencia de entrada.

Basándose en la ecuación (30):

$$\tau_r^{-1} = \tau_0^{-1} \left( 1 + \frac{P}{P_{sat}} \right), \quad (38)$$

cuando la potencia de entrada es igual a la potencia de saturación se tiene el caso  $\tau_r^{-1} = 2\tau_0^{-1}$ , el tiempo de relajación espontánea es el doble del tiempo de crecimiento de la fluorescencia. La figura 2.5 muestra la gráfica del inverso del tiempo de excitación y relajación como función de la potencia de entrada. Si se traza una línea paralela al doble del valor promedio del tiempo de relajación inverso ( $\tau_0^{-1}$ ) y se interpola gráficamente, se obtiene un valor aproximado de 0.18mW como potencia de saturación para la fibra HG980 (ver figura 2.5).



**Figura 2.5.** Cálculo de la potencia de saturación para la fibra HG980.

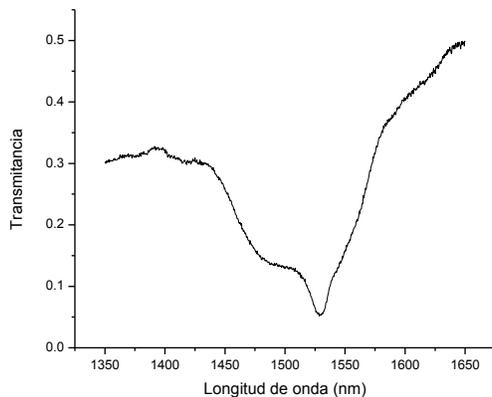
## 2.5.2 Cálculo experimental de la densidad óptica de la fibra

Para calcular la densidad óptica se utilizó el método de transmitancia no lineal. La transmitancia es la razón entre la potencia de entrada y la potencia de salida. Hay una relación de la transmitancia  $T$  y la densidad óptica  $\alpha_0 L$  mediante la siguiente ecuación (S.Stepanov, E. Hernández, 2008):

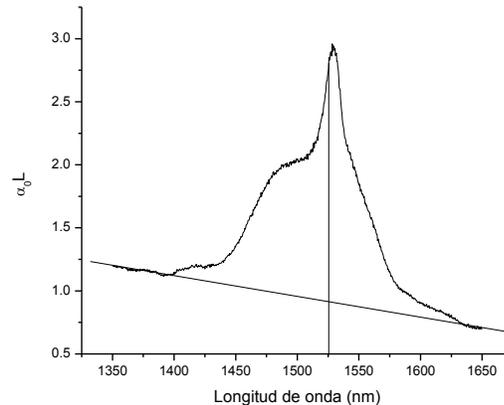
$$-\ln(T) = \alpha_0 L, \quad (39)$$

donde  $\alpha_0$  es el coeficiente de absorción óptica (no saturada), y  $L$  es la longitud de la fibra.

Se realizaron mediciones espectrales de transmitancia de la fibra dopada con erbio utilizando el analizador de espectros. El espectro de transmitancia de la fibra HG980, se muestra en la figura 2.6-a. Utilizando la ecuación 39, se graficó la densidad óptica en función de la longitud de onda (ver figura 2.6-b). Se obtuvo un valor de 1.9 de densidad óptica para la longitud de onda de 1526nm.



(a)



(b)

**Figura 2.6.** Espectro de transmitancia para la fibra HG980 de 3m **(a)**, densidad óptica de la fibra en función de la longitud de onda **(b)**. Para la longitud de onda de 1526 nm el valor es de la densidad óptica es de 1.9.

# Capítulo 3. Investigación Experimental de la Luz en FDE.

## 3.0 Introducción

El objetivo principal de este trabajo de tesis es la generación de nuevos conocimientos sobre los efectos de propagación de pulsos láser en el régimen de luz lenta/rápida en las fibras dopadas con erbio con saturación óptica.

Este capítulo se dividirá en dos partes: la investigación experimental de la luz lenta por medio de la transmitancia y el por medio de la fluorescencia transversal.

## 3.1 Investigación experimental de la luz lenta por medio de la transmitancia

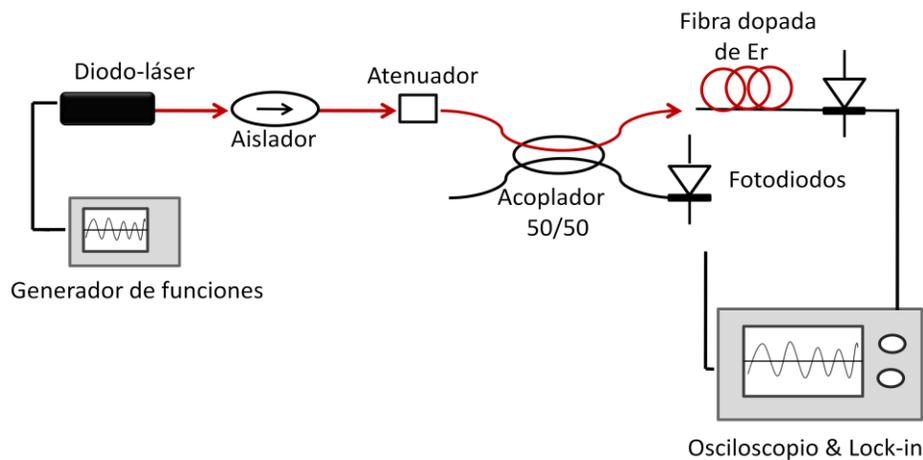
En esta parte se presentan algunos estudios experimentales de la propagación de pulsos láser en el régimen de la luz lenta/rápida bajo ciertas condiciones experimentales (potencia de entrada, profundidad de modulación, longitud de la fibra y frecuencia de modulación de la intensidad de la luz). Se estudió el desfase fraccional entre la señal de entrada y señal de salida de la fibra dopada con erbio, por medio de la medición de transmitancia. El desfase fraccional es la diferencia de fase de las dos señales dividida sobre  $180^\circ$  (o  $\pi$ ).

### 3.1.1 Arreglo experimental

El diagrama del arreglo experimental para el estudio del comportamiento de los pulsos de luz que se propagan a través de una fibra dopada con Erbio se muestra en la figura 3.1.

El generador de funciones, conectado al driver del diodo láser, modula sinusoidalmente la intensidad de la luz que sale del diodo-láser, emitiendo a una longitud de onda de 1526 nm. La luz pasa por un atenuador, con el que es posible controlar la potencia de entrada al acoplador. La potencia que entra al acoplador es dividida en dos partes, para nuestro caso, en dos partes iguales debido a la razón de división del mismo acoplador (50/50). Una de las terminales de salida del acoplador se conecta al fotodetector "F1" y la otra a la fibra dopada con erbio (FDE). Finalmente, la terminal de salida de la fibra dopada con erbio se conecta a un segundo fotodetector "F2" y ambos fotodetectores son conectados a un osciloscopio ó amplificador lock-in para el monitoreo de las señales.

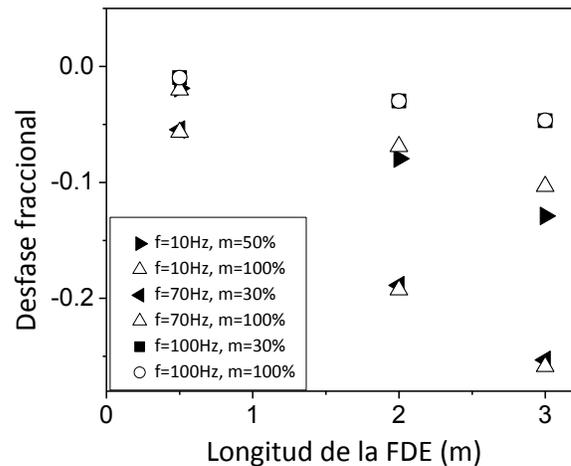
Con el primer fotodetector se lleva a cabo el monitoreo de la señal de entrada y con el segundo el de la señal de salida de la fibra dopada con erbio. Ambas señales son monitoreadas por medio del osciloscopio, en donde es posible observar el desfase entre ambas señales. Debido a que el desfase de las señales es difícil de medir con precisión por medio del osciloscopio, es necesario realizar estas mediciones por medio de un amplificador lock-in.



**Figura 3.1.** Diagrama del arreglo experimental para el estudio del comportamiento de los pulsos de luz que se propagan a través de una fibra dopada con Erbio.

### 3.1.2 Resultados

Se estudió experimentalmente cómo cambia el desfase fraccional de la señal en fibras de diferentes longitudes, variando la profundidad y la frecuencia de modulación. Se utilizaron fibras HG980 de tres longitudes diferentes: 0.5, 2 y 3 m. Para las fibra de 0.5 m y 2 m, se fijaron profundidades de modulación de  $m=50\%$  y  $100\%$ , mientras que para la fibra de 3 m,  $m=30\%$  y  $100\%$ . Se obtuvo el desfase fraccional para 10 frecuencias de modulación: 10, 20, 40, 70, 100, 200, 400, 700, 1000 y 2000 Hz, y para cada profundidad de modulación. Se observó que el desfase máximo para todos los casos se daba a una frecuencia de 70 Hz. Por esta razón se eligieron sólo tres frecuencias: una baja (10 Hz), una alta (1000 Hz) y una intermedia (70 Hz) para analizar las dependencias mencionadas. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.2.



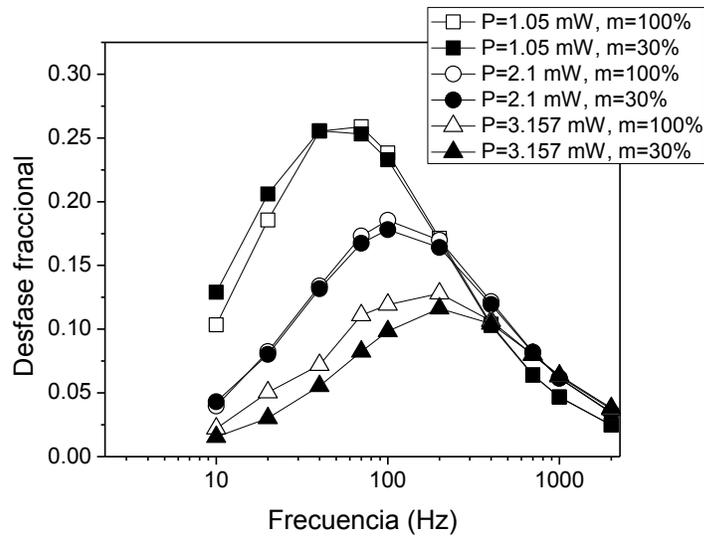
**Figura 3.2.** Desfase fraccional como función de la longitud de la FDE, frecuencia y profundidad de modulación.

Se puede ver en la figura 3.2 que el desfase fraccional no depende de la profundidad de modulación de la señal. El valor del desfase (a cualquier frecuencia) aumenta con la longitud de la fibra. Para la fibra de 0.5 metros el valor del desfase no difiere mucho para las tres frecuencias analizadas. Sin embargo

para las fibras de 2 m y 3 m, es más acentuada la diferencia en el desfase con la frecuencia de modulación.

En otro experimento, se estudió cómo cambia el desfase fraccional de una señal sinusoidal con la frecuencia de modulación y para diferentes potencias de entrada. Se utilizó la fibra óptica HG9800 de 3 metros. Inicialmente se trabajó con 5 potencias de entrada: 0.25, 0.5, 1, 2 y 3 mW. Sin embargo se obtuvo un comportamiento extraño a nuestro punto de vista: a potencias bajas el desfase era mayor que a potencias mayores, además de que el máximo desfase se daba a frecuencias grandes. Por esta razón se realizaron una serie de mediciones para ver si había alguna influencia de la señal de fluorescencia. Se trabajó con una señal rectangular, con una frecuencia de 8 Hz, una frecuencia baja para que los iones de erbio pudiesen ser absorbidos y relajados por completo durante ese tiempo. Se observó que para potencias de 0.25 y 0.5 mW, la contribución de la fluorescencia era muy grande, para 1 mW dicha contribución ya era mínima. Por este motivo, se descartaron las mediciones para las dos potencias más bajas. Respecto a potencias mayores, se observó que el valor del desfase disminuía con el aumento de potencia además de que dicho máximo se desplazaba a frecuencias mayores. La frecuencia a la que se daba el máximo desfase era 70 Hz, para una potencia promedio de 1 mW, 100 Hz para 2 mW y 200 Hz para 3 mW. Se observó también que el valor del desfase fraccional no depende de la profundidad de modulación.

En la figura 3.3 se muestra la relación (mencionada anteriormente) de la frecuencia de modulación y el desfase fraccional para las tres potencias de entrada con dos profundidades de modulación: 30% y 100%.



**Figura 3.3.** Desfase fraccional como función de la frecuencia, potencia de entrada y profundidad de modulación.

### 3.1.3 Conclusiones parciales:

1.- En esta sección se estudió el desfase fraccional entre una señal transmitida a través de una fibra dopada con erbio con respecto a la señal de entrada a la fibra. Se cambiaron parámetros como lo son la longitud de la fibra, profundidad y frecuencia de modulación, y potencia promedio de entrada.

2.- El desfase fraccional aumenta con la longitud de la fibra, particularmente el efecto se acentúa para frecuencias de modulación que se acercan a la frecuencia a la que el desfase es máximo y disminuye con frecuencias extremas (muy grandes o muy chicas).

3.- Existe una dependencia del desfase fraccional con la frecuencia de modulación que a su vez depende de la potencia promedio de entrada. Se trabajó con tres potencias: 1.05, 2.1 y 3.157 mW. Se observó que el desfase fraccional disminuía con el aumento de la potencia, además, el efecto estaba más marcado para frecuencias a la que el desfase era máximo.

4.- La frecuencia a la que se daba el máximo desfase se desplazaba a frecuencias mayores con el aumento de la potencia: Para 1.05 mW el desfase máximo se daba a una frecuencia de 70 Hz, para 2.1 mW a 100 Hz y para 3.157 mW a 200 Hz.

5.- El desfase fraccional no depende de la profundidad de modulación.

## **3.2 Investigación experimental de la luz lenta por medio de la fluorescencia transversal**

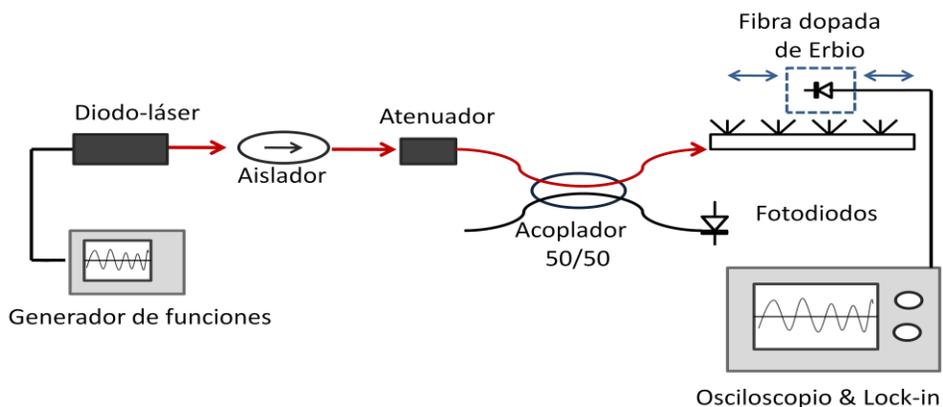
### **3.2.1 Introducción**

En esta sección se investigó un nuevo método para la observación de la propagación de los pulsos utilizando la fluorescencia transitoria en la superficie de la fibra. Anteriormente, los cambios en forma y en retraso del pulso a través de la fibra fueron investigados sólo por el método “destrutivo” – cortando la fibra por pedazos pequeños desde su longitud inicial empezando en la salida de la fibra hasta su entrada [G.M. Gehring, 2006].

Se realizaron mediciones de la señal de fluorescencia transversal transitoria (es decir, excitada por los pulsos de luz modulada) al inicio de la fibra, para así conocer cómo es la respuesta de la señal de fluorescencia ante el cambio de parámetros como lo son la frecuencia de modulación, potencia de entrada y profundidad de modulación. Después de lo cual se prosiguió con mediciones equidistantes de la señal de fluorescencia a lo largo de toda la fibra. Por último se realizaron mediciones al final de la fibra y se compararon con los datos obtenidos por medio de la transmitancia. Con la información obtenida a través de la fluorescencia, se puede reconstruir cómo va cambiando el desfase de la señal, su amplitud y su potencia a lo largo de la fibra.

### 3.2.2 Arreglo experimental

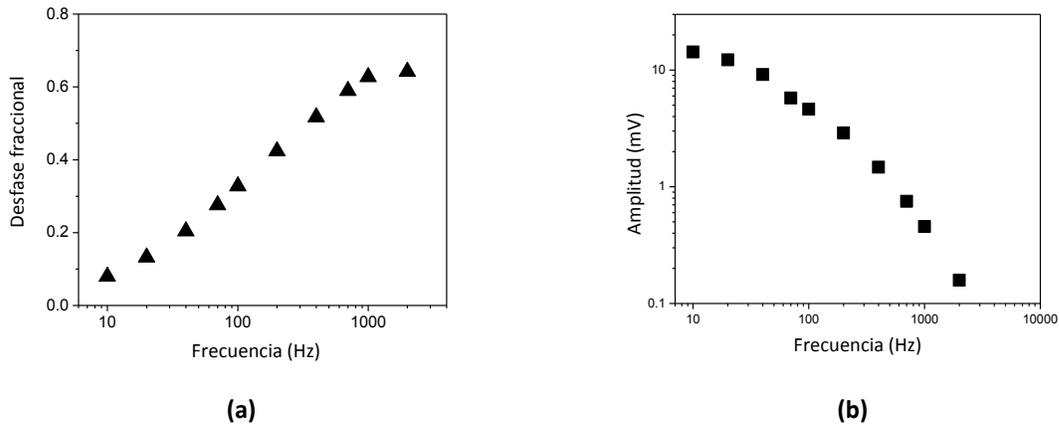
Para el estudio de la propagación lenta de pulsos de luz a lo largo de la fibra por medio de la fluorescencia, se armó un arreglo experimental similar al anterior. Nuevamente el generador de funciones modula sinusoidalmente la intensidad de la luz que sale del diodo láser. La luz pasa por un aislador después por un atenuador y posteriormente entra a un acoplador 50/50. Una de las terminales de salida del acoplador se conecta al fotodetector "F1", la otra terminal va conectada a la fibra dopada con erbio de 3 m. La fibra es "dividida" en 6 pedazos de 50 cm cada uno (sin romper la fibra). Se toma la señal de fluorescencia cada 50 cm hasta llegar a los 3 m. La señal de fluorescencia es monitoreada en el osciloscopio.



**Figura 3.4.** Diagrama del arreglo experimental para el estudio del comportamiento de los pulsos de luz que se propagan en la fibra dopada con erbio, por el método de fluorescencia transversal transitoria.

### 3.2.3 Resultados

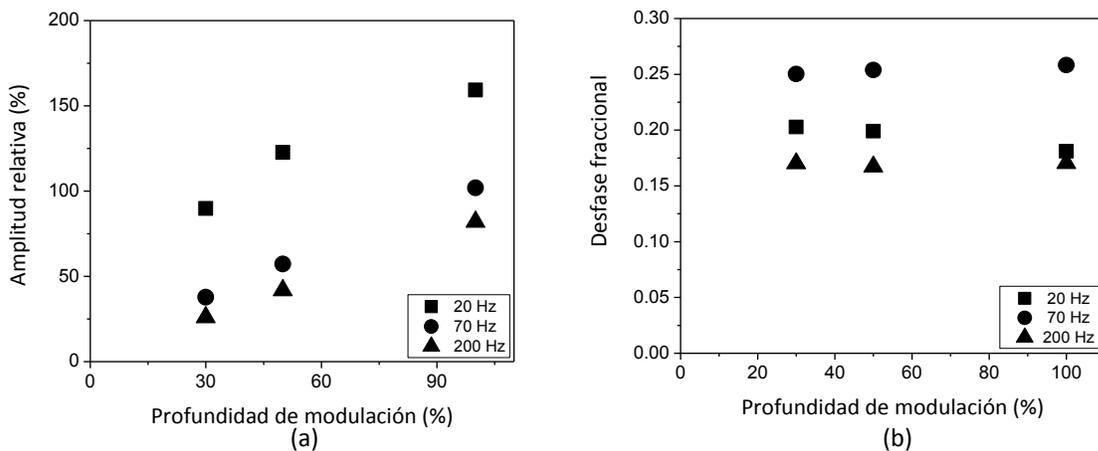
Para conocer cuál era la respuesta de la señal de fluorescencia con la variación de la frecuencia de modulación. Se comenzó con mediciones al inicio de la fibra (a 5 cm del empalme acoplador-fibra dopada con erbio). Se estudió la relación del desfase fraccional y la amplitud como función de la frecuencia de modulación. Las graficas obtenidas se muestran en la figura 3.5.



**Figura 3.5.** Desfase fraccional (a) y amplitud (b) de la señal de fluorescencia medida al inicio de la fibra como función de la frecuencia de modulación ( $P_0=0.53$  mW,  $m=100\%$ ).

Se puede observar en la figura 3.5, el desfase fraccional aumenta con la frecuencia de modulación y además tiende a un valor fijo alrededor de 0.65. Por otro lado la amplitud disminuye con el aumento de frecuencia.

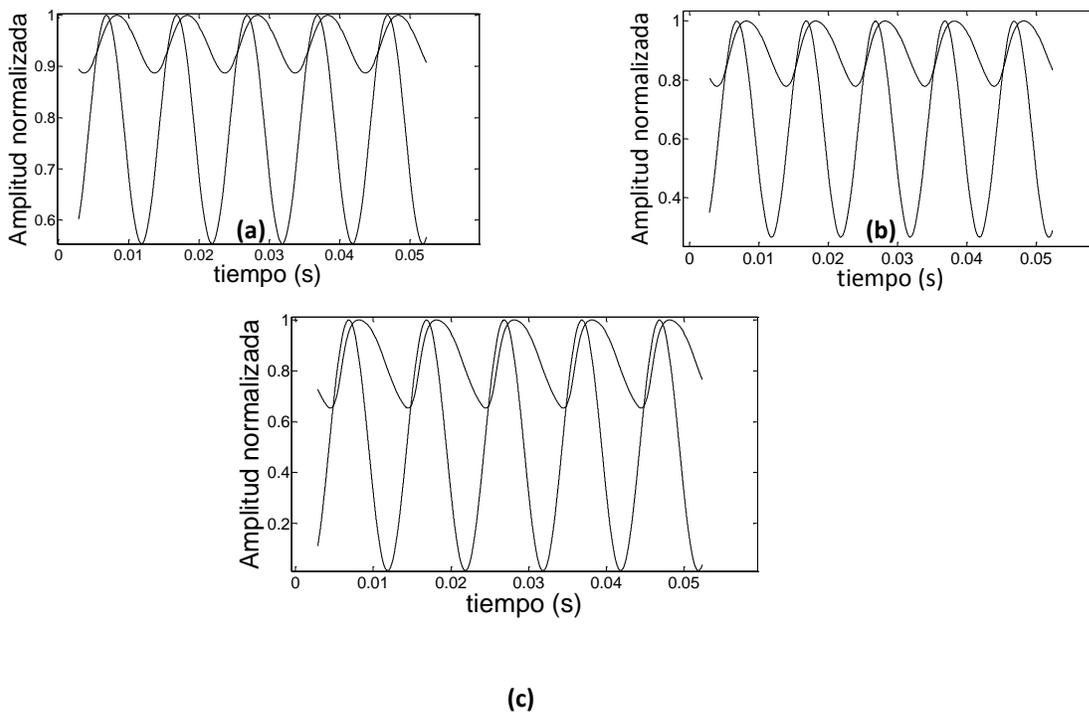
Se prosiguió a estudiar el papel que juega la profundidad de modulación con el desfase fraccional y la amplitud relativa. Se seleccionó tres frecuencias de modulación: 20, 70 y 200 Hz y tres profundidades de modulación: 30, 60 y 100%. Las relaciones mencionadas se muestran en la figura 3.6.



**Figura 3.6.** Amplitud relativa (a) y desfase fraccional (b) como función de la profundidad de modulación ( $P_0=1$  mW).

Como se puede ver en la figura 3.6-(a) la amplitud relativa aumenta linealmente con el aumento de la profundidad de modulación. La figura 3.6-(b) demuestra que el desfase fraccional en la señal de fluorescencia no cambia con la profundidad de modulación.

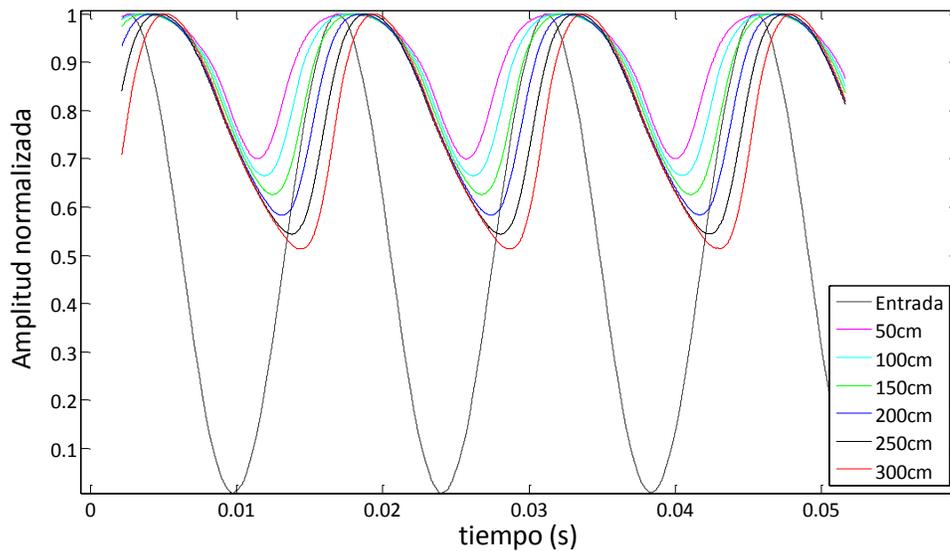
Obtenidos estos resultados se quiso estudiar si había algún cambio en la forma de la señal de fluorescencia con la profundidad de modulación ( $m$ ). Para esto se estudió la señal de fluorescencia al final de la fibra de 3 m. Se fijó una potencia promedio de entrada de 3.15 mW, una frecuencia de modulación de 100 Hz. Se trabajó con tres profundidades de modulación: 30, 60 y 100%. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.7, para los tres casos la señal de amplitud mayor es la de entrada, mientras que la de amplitud menor es la señal de fluorescencia al final de la fibra



**Figura 3.7.** Señal de fluorescencia a 5 cm del inicio de la fibra, con una potencia de entrada de 1.05 mW, frecuencia de 70 Hz y profundidades de modulación,  $m=30$  (a), 60 (b) y 100% (c).

Se puede ver en la figura 3.7 que la forma de la señal de fluorescencia es prácticamente sinusoidal cuando la profundidad de modulación es del 30%. Sin embargo empieza a tener deformación con profundidades de modulación mayores.

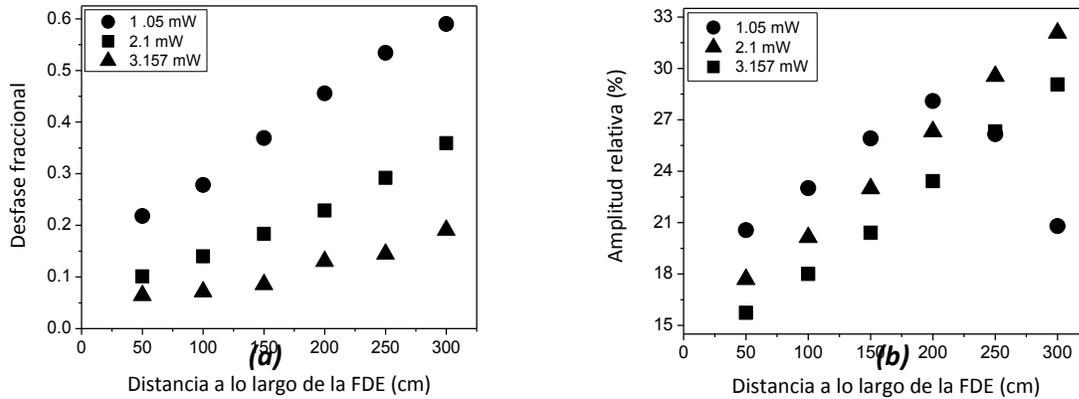
Como siguiente paso se prosiguió con mediciones de fluorescencia a lo largo de la fibra. Se fijó una profundidad de modulación del 100%, una frecuencia de 70 Hz. Se estudió cómo cambia el desfase fraccional y la profundidad de modulación para diferentes potencias de entrada: 1.05, 2.1 y 3.157 mW. Se comparó la señal de entrada y la señal de fluorescencia a 50 cm del empalme entre el acoplador y la fibra y después, cada 50 cm, hasta llegar a longitud total de la fibra. A continuación se muestra la gráfica de la señal de fluorescencia para la potencia de entrada 2.1 mW para los 6 puntos equidistantes a lo largo de la fibra.



**Figura 3.8.** Señal de fluorescencia a lo largo de la fibra. Potencia promedio de entrada 2.1 mW, frecuencia de modulación de 70 Hz y profundidad de modulación,  $m=100\%$ .

Tanto el valor del desfase fraccional como la amplitud relativa entre la señal de entrada y la señal de fluorescencia aumentaron conforme la longitud a la que se colocó el fotodetector a lo largo de la fibra. Mediciones similares se realizaron para la potencia de entrada de 1.05 y 3.157 mW.

Para cuantificar el desfase y el cambio en la profundidad de modulación, se realizaron las siguientes gráficas, en la cuales se calculó el desfase fraccional y la profundidad de modulación de la señal de fluorescencia como función de la distancia a lo largo de la fibra para las tres potencias de entrada.

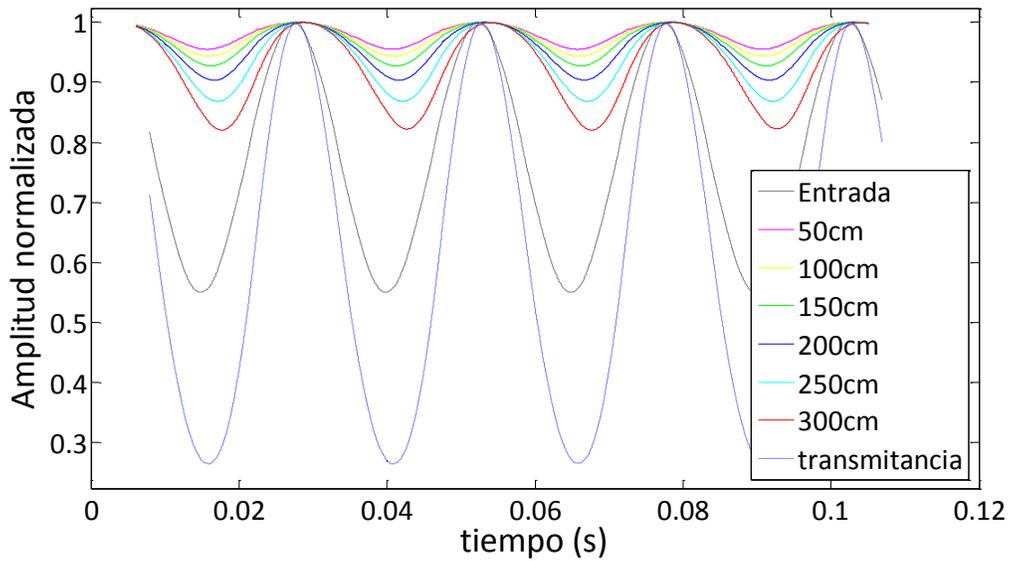


**Figura 3.9.** Desfase fraccional (a) y profundidad de modulación (b) como función de la distancia. Frecuencia de modulación 70 Hz,  $m=100\%$ . Los círculos representan la señal cuya potencia de entrada,  $P_o$ , era de 1.05 mW, los triángulos  $P_o=2.1$  mW y los cuadrados  $P_o=3.157$  mW.

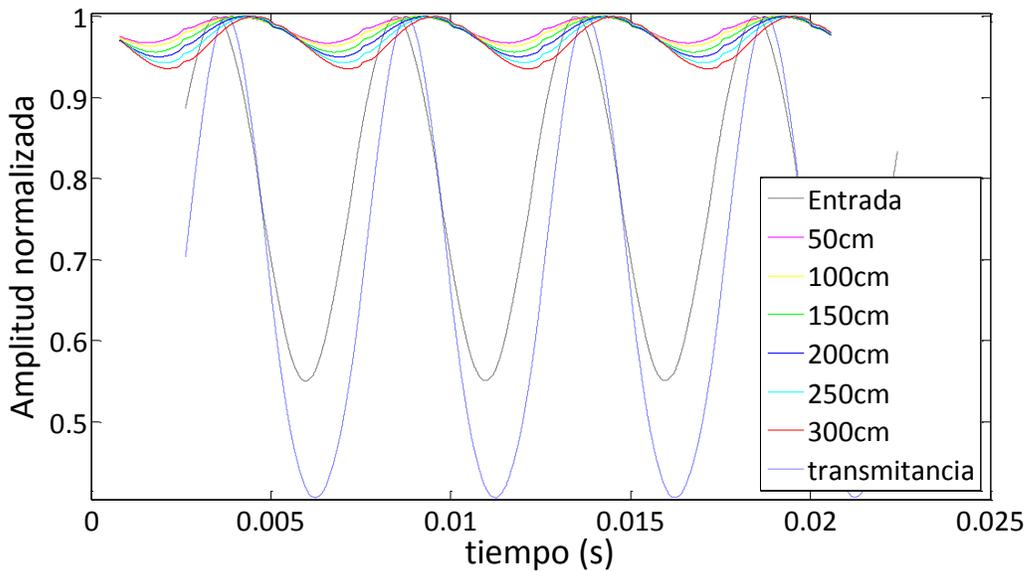
Se puede observar un crecimiento lineal del desfase fraccional con la distancia a lo largo de la fibra, para las tres potencias de entrada. Se obtuvo el mayor desfase fraccional (para todas las distancias a lo largo de la fibra) para 1.05 mW y cuyo valor del desfase fue disminuyendo con el aumento de la potencia.

Posteriormente se realizaron mediciones de la señal de fluorescencia a lo largo de la fibra fijando una profundidad de modulación del 30%, una potencia de entrada de 3.157 mW y tres frecuencias de modulación: 40, 200 y 1000 Hz. Para el último caso en donde la frecuencia de modulación era de 1000 Hz, la señal de fluorescencia era muy tenue, las curvas sobrepuestas y con una profundidad de modulación del 0.55% además de que la forma sinusoidal estaba muy distorsionada. No se pudo calcular el desfase fraccional para dicha frecuencia. Por esta razón se estudiaron las señales cuya

frecuencia de modulación era de 40 y 200 Hz y cuyas gráficas experimentales se muestran en la figura 3.10 y 3.11.

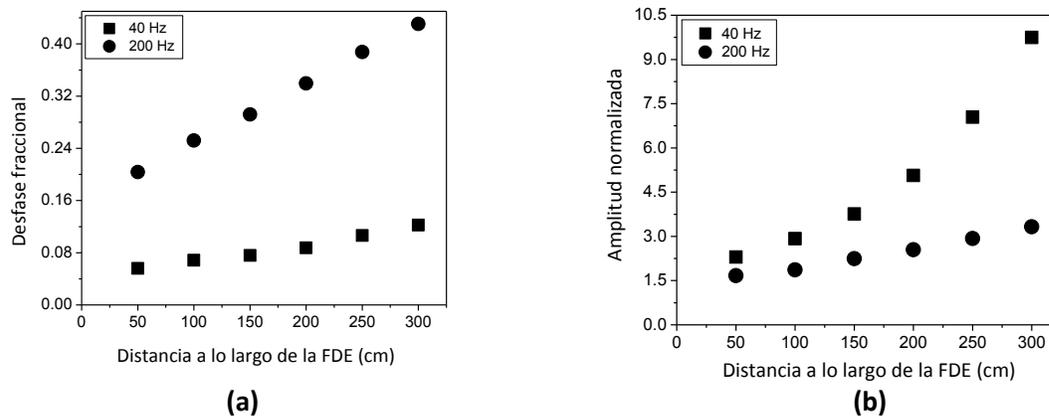


**Figura 3.10.** Señal de fluorescencia a lo largo de la fibra con una potencia de entrada de 3.157 mW,  $m=30\%$  y una frecuencia de modulación de 40 Hz.



**Figura 3.11.** Señal de fluorescencia a lo largo de la fibra con una potencia de entrada de 3.157 mW,  $m=30\%$  y una frecuencia de modulación de 200 Hz.

Se puede ver en las figuras 3.11 y 3.12 que para ambos casos existe un desplazamiento de la señal de fluorescencia con respecto a la señal de entrada con la distancia. Este desplazamiento es mayor para la frecuencia de 200 Hz. Por otro lado se puede observar que también hay un crecimiento en la amplitud normalizada con al aumento de la distancia, el crecimiento es mayor para la frecuencia de 40 Hz. Para comparar cuantitativamente estos dos casos se realizaron dos gráficas en la que se estudió el desfase fraccional y la profundidad de modulación como función de la distancia. Los resultados se muestran a continuación en las figuras 3.12-(a) y 3.12-(b).

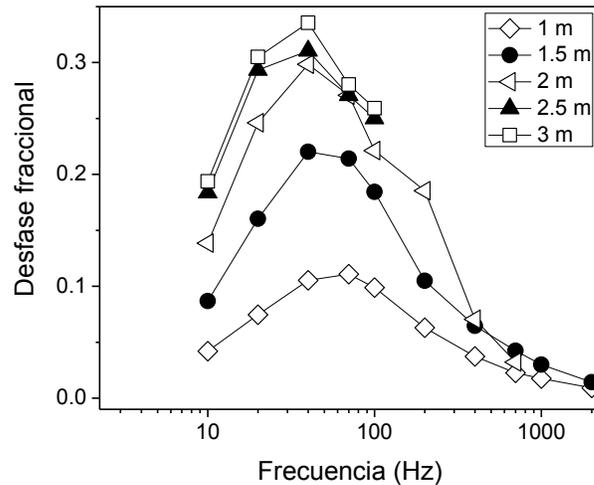


**Figura 3.12.** Desfase fraccional como función de la distancia **(a)** y profundidad de modulación como función de la distancia **(b)** para la señal de fluorescencia a lo largo de la fibra. Potencia de entrada 3.157 mW, profundidad de modulación de 30%. Los cuadrados representan la señal de entrada que fue modulada a 40 Hz y los círculos a la señal que fue modulada a 200 Hz.

Se puede observar que hay un crecimiento lineal del desfase fraccional con la distancia. Sin embargo el efecto es mucho más acentuado para el caso de la señal de entrada modulada a 200 Hz. Para la señal modulada a 40 Hz, hay un desfase máximo 0.122 al final de la fibra (a 300 cm), mientras que para la señal de 200 Hz, el desfase fraccional máximo alcanza un valor de 0.431.

Por último se realizaron mediciones al final de la fibra (a 3 m) del desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación. Se fijó una potencia de entrada de 0.53 mW y una profundidad de

modulación del 100%. A los datos obtenidos se les sustrajo la respuesta de la fluorescencia (análogo a la figura 3.5-(a)), obteniendo las curvas que se muestran en la figura 3.13).



**Figura 3.13.** Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación de la señal de fluorescencia al final de la fibra al haber sustraído el desfase fraccional de señal de fluorescencia al inicio de la fibra (a 5 cm). Potencia de entrada 0.53 mW y profundidad de modulación 100%.

### 3.2.4 Conclusiones parciales.

1.- En esta sección se estudió la propagación lenta de pulsos de luz utilizando fluorescencia transversal transitoria.

2.- Se estudió la respuesta de la señal de fluorescencia del desfase fraccional y la amplitud relativa como función de la frecuencia de modulación.

3.-Se encontró que no existe dependencia entre la profundidad de modulación y el valor del desfase fraccional y encontró una dependencia lineal de crecimiento de la amplitud relativa con el aumento de la profundidad de modulación.

4.- Se estudió el cambio en la forma de la señal de fluorescencia al final de la fibra ante diferentes profundidades de modulación de la señal de entrada. Se observó que entre mayor sea la profundidad de modulación, mayor es la deformación de la señal de fluorescencia.

5.-Se analizó la señal de fluorescencia a lo largo de la fibra variando parámetros como la potencia de entrada, frecuencia y profundidad de modulación. Para todos los casos hubo un corrimiento de la señal de fluorescencia respecto a la señal de entrada y un crecimiento de la amplitud normalizada con el aumento de la distancia a lo largo de la fibra.

6.- Se realizaron mediciones al final de la fibra del desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación para una potencia y profundidad de modulación fija. Se compararon los datos obtenidos por medio de la fluorescencia y por medio de la transmitancia obteniendo curvas similares.

# Capítulo 4: Simulación numérica

## 4.0 Introducción

La propagación de los pulsos de luz a través de un medio saturable es un proceso no lineal y requiere un análisis matemático complejo. En este capítulo se describe una simulación numérica que aborda dicho problema de una manera más sencilla.

## 4.1 Método numérico

Se considera un sistema energético de dos niveles para la saturación de los iones de  $Er^{3+}$ . Para el cálculo numérico, se utiliza una aproximación de un contraste de modulación baja ( $m \ll 1$ ), que permite considerar la propagación de la componente sinusoidal de la señal modulada como una perturbación débil. Se considera una fibra de longitud total " $z$ ", dividida en un número grande de segmentos de una longitud corta,  $\Delta z$ . Dentro de cada segmento la potencia de luz transmitida se supone que es uniforme a lo largo del segmento  $\Delta z$ , y la dinámica de cambio de la absorción de este segmento se determina por una ecuación analítica obtenida en aproximación de la potencia de iluminación fija. La potencia de salida de cada segmento se calculará según la absorción de dicho segmento. La potencia de la luz en la salida del primer segmento se tomará como la potencia de entrada del próximo segmento y así sucesivamente hasta llegar al final de la fibra. La potencia de salida (el valor promedio, y la amplitud compleja de parte oscilatoria) se calculará como resultado de pasos parciales a través del arreglo de los segmentos.

Los parámetros fundamentales para el análisis numérico son la potencia de la luz,  $P(t, z)$ , y la absorción óptica saturable,  $\alpha(t, z)$ . Ambos parámetros varían con el tiempo y la distancia.

Las ecuaciones que gobiernan la propagación de luz a través de un medio saturable son las ecuaciones 40 y 41. La primera describe la atenuación espacial de la intensidad de la luz (ver ecuación 1.18) y la segunda la saturación de la absorción óptica.

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\alpha P \quad (40)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = -(1 + P) \cdot \left( \alpha - \frac{1}{1 + P} \right) \quad (41)$$

La última ecuación proviene de la ecuación de razón de la población del estado meta-estable:

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = (1+P) \cdot \left( \alpha - \frac{1}{1+P} \right). \quad (42)$$

El coeficiente de absorción está dado por la siguiente ecuación:

$$\alpha = \sigma \cdot (N_1 - N_2) = \sigma \cdot (N_0 - 2N_2). \quad (43)$$

Dado que la fibra se ilumina con luz de longitud de onda de 1526 nm, la sección transversal de emisión es igual a la sección transversal de absorción,  $\sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma$ .

Ahora bien, si se sustituye la ecuación 43 en la 42 se obtiene una relación del cambio del coeficiente de absorción con el tiempo ( $\partial\alpha/\partial t$ ), que es la ecuación 41.

Las condiciones de frontera para las ecuaciones diferenciales 40 y 41 son las siguientes:

$$P(t,0) = P_0 \cdot [1 + m \sin(\omega t)], \quad (44)$$

$$\alpha(0,z) = 1. \quad (45)$$

Se estudia la propagación de una secuencia de pulsos. Sin embargo, éstos pueden ser aproximados por la suma de armónicos. En la forma compleja, la señal sinusoidal se presenta por

$$P(t,z) = P_0(z) + \frac{P_1(z)}{2} \exp(i\omega t) + \frac{P_1^*(z)}{2} \exp(-i\omega t), \quad (46)$$

$$\alpha(t,z) = \alpha_0(z) + \frac{\alpha_1(z)}{2} \exp(i\omega t) + c.c. \quad (47)$$

Si se sustituye las ecuaciones 46 y 47 en 40 y 41 y se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales aplicando las condiciones iniciales dadas por las ecuaciones 44 y 45 se obtiene el valor promedio de la potencia y la absorción ( $P_0$  y  $\alpha_0$ ) así como la amplitud compleja del primer armónico de la potencia y el coeficiente de absorción ( $P_1$  y  $\alpha_1$ ). De esta manera se tienen ya los parámetros mencionados para el  $n$ -ésimo segmento de la fibra. Cabe señalar que para simplificar el problema, todas las unidades utilizadas en la simulación numérica son normalizadas.

$$\alpha_{0n} = \frac{1}{1 + P_{0n-1}}, \quad (48)$$

$$\alpha_{1n} = -\frac{P_{1n-1} \cdot \alpha_{0n-1}}{1 + P_{0n-1} - i\omega}, \quad (49)$$

$$P_{0n} = P_{0n-1} \cdot (1 - \Delta z \cdot P_{0n-1}), \quad (50)$$

$$P_{1n} = P_{1n-1} - \Delta z \cdot (\alpha_{1n-1} \cdot P_{0n-1} + \alpha_{0n-1} \cdot P_{1n-1}), \quad (51)$$

Donde el índice  $n$  representa el número del segmento.

Para conocer el desfase fraccional ( $\Delta\varphi$ ) de la señal en diferentes puntos equidistantes a lo largo de la fibra, se utiliza la ecuación 52:

$$\Delta\varphi_n = \arctan\left(\frac{\text{Im}(P_{1n})}{\text{Re}(P_{1n})}\right) \quad (52)$$

La ecuación 53 indica cómo va variando la profundidad de modulación a lo largo de la fibra.

$$m_n = \frac{\text{abs}(P_{1n})}{P_{0n}} \quad (53)$$

Es importante mencionar que las ecuaciones 50-53 son únicamente para pulsos de luz transmitida. La señal de fluorescencia en el  $n$ -ésimo segmento se determina por la población del estado meta-estable  $N_2$ . Reescribiendo la ecuación 43 y dividiendo todo sobre  $\sigma N_0$ , se obtiene:

$$\frac{N_2}{N_0} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\alpha}{\sigma N_0} \right) \quad (54)$$

El término  $\sigma N_0$ , indica el estado en donde no hay luz y toda la población se encuentra en el nivel energético  $N_1$ . El término  $\frac{\alpha}{\sigma N_0}$ , se denomina coeficiente de absorción no saturada,  $\alpha_0$ . La población del estado  $N_2$ , está normalizada y se denotará como  $N_{20}$ . De esta manera la ecuación 44 queda reducida a la siguiente expresión:

$$N_{20n} = \frac{1}{2}(1 - \alpha_{0n}) , \quad (55)$$

e indica la población promedio de la señal de fluorescencia. La parte oscilatoria de la población está dada por la ecuación 56:

$$N_{21n} = -\frac{1}{2}\alpha_{1n} , \quad (56)$$

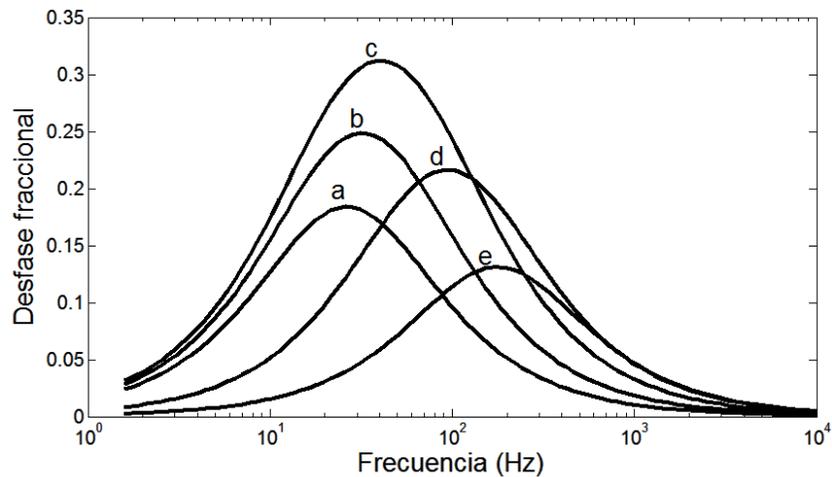
donde  $\alpha_o$  y  $\alpha_1$  están dadas por las ecuaciones 48 y 49 respectivamente.

El desfase de la señal se calcula mediante la ecuación 57:

$$\Delta\varphi_n = \arctan\left(\frac{\text{Im}(N_{21n})}{\text{Re}(N_{21n})}\right) . \quad (57)$$

## 4.2 Resultados gráficos de la simulación numérica

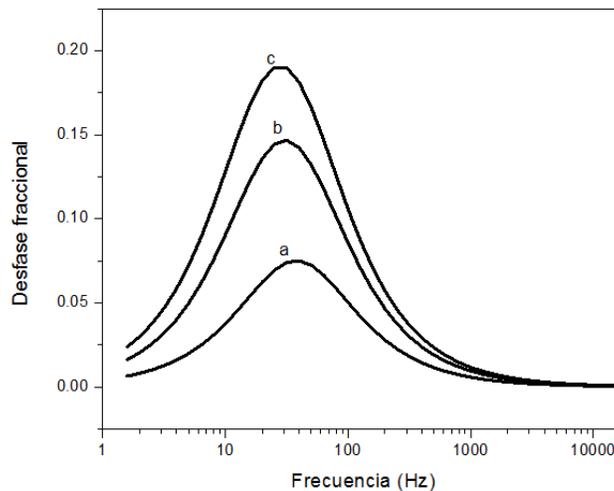
Como primer paso en la simulación numérica, se calculó dependencias de luz transmitida sobre frecuencias de modulación. Se calculó el desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación para diferentes potencias de entrada: 0.25, 0.5, 1, 2 y 3 mW. Dicha relación de muestra en la figura 4.1.



**Figura 4.1** Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación para la luz transmitida, para 5 potencias de entrada (mW): 0.25-a, 0.5-b, 1-c, 2-b, 3-d y una densidad óptica inicial normalizada de 10.

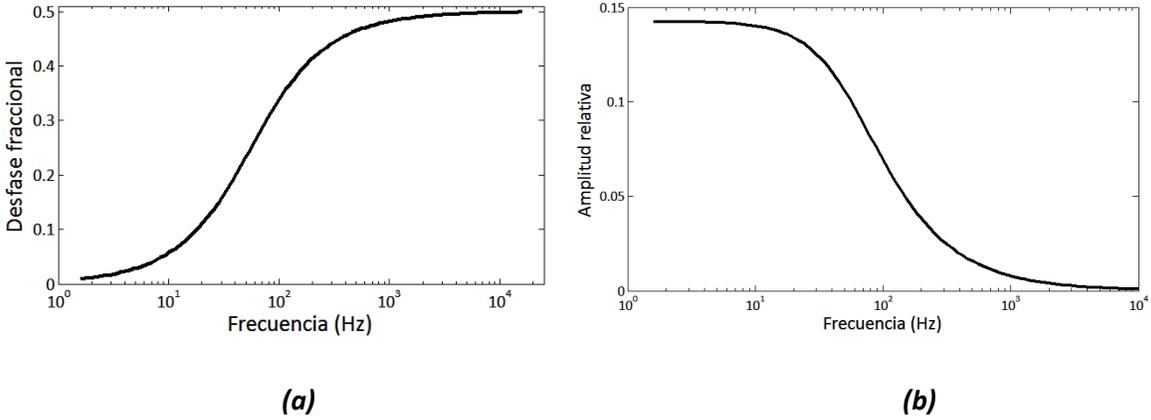
Se puede observar un comportamiento de pulsos de luz transmitida semejante a los trabajos previos realizados en el tema (ver figuras 1.6 y 1.8), así como una estrecha similitud con los datos experimentales obtenidos en este trabajo de tesis (ver figura 3.3).

En la figura 4.2 se muestra la relación que existe del desfase fraccional con la frecuencia de modulación, para diferentes valores de la densidad óptica. Entre mayor sea la densidad óptica, mayor el desfase fraccional. Dado que la densidad óptica está normalizada ( $\alpha_0 L$ ), se puede hacer una equivalencia con la longitud de la fibra dopada con erbio, entre mayor sea la densidad, mayor es la longitud de la fibra. De este modo se podría analizar la figura desde la perspectiva, en cómo va cambiando el desfase de la señal con la distancia a lo largo de una fibra.



**Figura 4.2** Desfase fraccional como función de la frecuencia para una potencia fija de (falta dato!!) para diferentes densidades ópticas: 1.9-a, 3.8-b, 7.6-c.

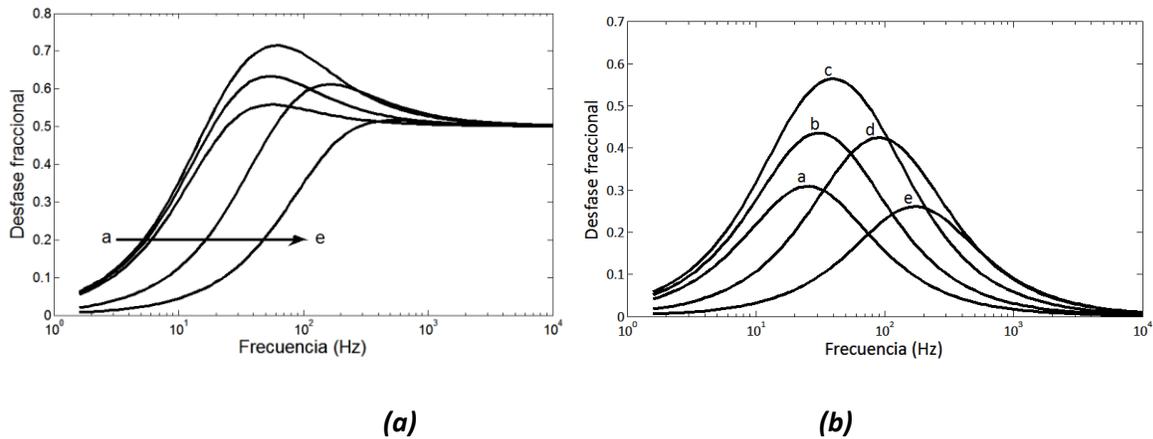
Teniendo ya información sobre la luz transmitida, se prosiguió entonces a estudiar la señal de fluorescencia. Como en el caso del capítulo 3, se estudió la respuesta de la señal de fluorescencia al cambio de la frecuencia de modulación. Se encontró teóricamente la relación que existe del desfase fraccional (ver figura 4.3-a) y la amplitud relativa (ver figura 4.3-b) con la frecuencia de modulación justo al inicio de la fibra.



**Figura 4.3 (a)** Desfase fraccional y **(b)** amplitud relativa de la señal de fluorescencia como función de la frecuencia de modulación al inicio de la fibra.

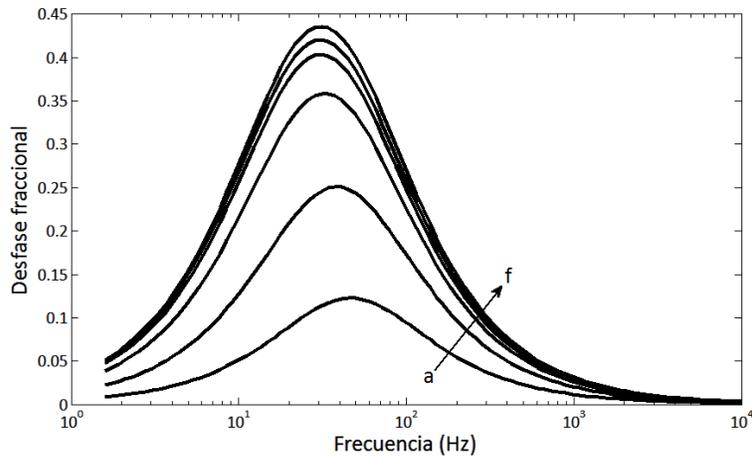
Se puede observar en la figura 4.3 que el desfase fraccional aumenta con la frecuencia de modulación y además a frecuencias altas tiende a un valor fijo de 0.5. Por otro lado, la amplitud de la señal disminuye con el aumento de la frecuencia.

La figura 4.4 es análoga a la figura 4.1 sólo que ahora la relación del desfase fraccional con la frecuencia de modulación es para la señal de fluorescencia al final de la fibra. Para compensar el desfase propio de la señal de fluorescencia, se resta la respuesta de la fluorescencia al inicio de la fibra. De esta manera se puede ver que las gráficas 4.4-b y 4.1 tienen mucha similitud.



**Figura 4.4 (a)** Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación en la salida de la fibra, para potencias de entrada, 0.25-a, 0.5-b, 1-c, 2-d, 3-e. **(b)** Mismas dependencias que en el inciso (a), pero con la substracción de la respuesta de la señal de fluorescencia al inicio de la fibra.

Teniendo ya los datos del comportamiento de la señal de fluorescencia al inicio y al final de la fibra, se prosiguió entonces a simular numéricamente cómo cambia el desfase fraccional a lo largo de la fibra. Se graficó la relación que existe entre el desfase fraccional con la frecuencia de modulación para diferentes potencias de entrada.



**Figura 4.5** Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación para una potencia normalizada de entrada de 2.5, para diferentes longitudes de propagación (también normalizadas,  $\alpha_0 L$ ): 1.7, 3.3, 5.0, 6.7, 8.3, 10 (a-f). Las curvas fueron corregidas restando el desfase propio de la fluorescencia.

Como se puede ver en la figura 4.5, el valor del desfase fraccional aumenta con la distancia a lo largo de la fibra. Así mismo se puede notar que la frecuencia a la que se da el máximo desfase se recorre a frecuencias menores con el aumento de la distancia.

### 4.3 Conclusiones parciales

1.- Mediante una simulación numérica realizada en Matlab, se estudió teóricamente la propagación lenta de pulsos luz así como la señal de fluorescencia de dichos pulsos en una fibra óptica dopada con erbio.

2.- Existe una dependencia del desfase fraccional con la frecuencia de modulación (resulta un comportamiento de una curva que crece, llega a un máximo y después decrece). El desfase a su vez depende de la potencia promedio de entrada. Se estudiaron 5 potencias: 0.25, 0.5, 1, 2 y 3 mW. Se observó que existe un valor máximo del desfase que corresponde a la potencia de la luz de 1 mW.

3.- Con el aumento de la potencia, la frecuencia a la que se daba el máximo desfase se desplaza siempre hacia frecuencias mayores.

4.- Existe una correlación del desfase fraccional con la densidad óptica. Entre mayor sea la densidad, mayor el desfase, lo que sería el análogo a afirmar que entre mayor sea la longitud de la fibra, mayor es el desfase (al final de la fibra).

5.- Se estudió teóricamente la respuesta de la señal de fluorescencia al cambio de la frecuencia de modulación de la señal. Justo al inicio de la fibra, se encontró una relación del desfase fraccional y la amplitud relativa con la frecuencia de modulación.

6.- Se estudió el desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación para diferentes potencias de entrada (0.25, 0.5, 1, 2 y 3 mW) al final de la fibra. Después de haber sustraído la respuesta de la señal de fluorescencia al inicio de la fibra, se obtuvo un comportamiento muy similar a la señal transmitida cuando se le realizó el mismo análisis.

7.- Se analizó el desfase fraccional de la señal de fluorescencia como función de la frecuencia de modulación para diferentes distancias a lo largo de la fibra. Se encontró que el valor del desfase fraccional aumenta con la distancia. Además, la frecuencia a la que se da el máximo desfase se recorre a frecuencias menores con el aumento de la distancia.

# Capítulo 5: Análisis y discusiones

## 5.0 Introducción

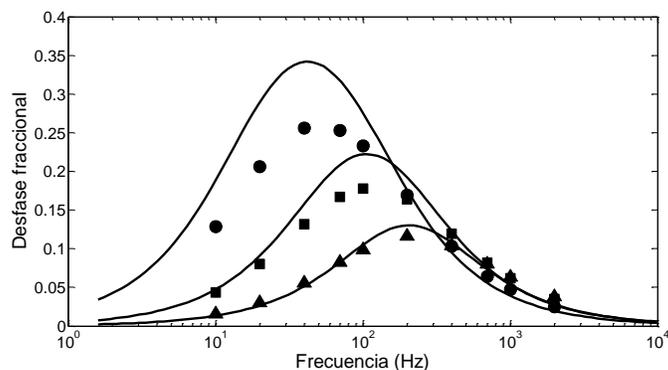
En el presente capítulo se hace una comparación de los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio con los resultados teóricos mediante la simulación numérica para la propagación lenta de pulsos de luz transmitida y para pulsos de luz utilizando fluorescencia transversal transitoria.

## 5.1 Comparación de los datos experimentales con los teóricos

A continuación se presentan los datos experimentales junto con los datos de la simulación teórica para pulsos de luz transmitidos. Se variaron los parámetros de potencia de saturación y la densidad óptica en la simulación numérica para ver cual combinación de estos parámetros hace un mejor ajuste.

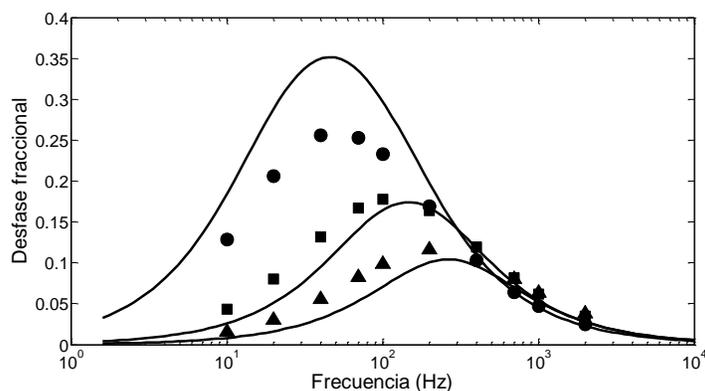
La potencia de saturación y la densidad óptica fueron obtenidas experimentalmente, ver capítulo 2, obteniendo un valor de 0.18 mW y 11.4 respectivamente. En la figura 5.1 realizó una comparación de cómo cambia el desfase fraccional con la frecuencia de modulación para tres potencias promedio de entrada: 1,2,3 mW, utilizando los parámetros mencionados anteriormente para la simulación numérica.

Se puede ver en la figura 5.1 que para una potencia de 3 mW, el ajuste teórico concuerda bastante bien con los puntos experimentales, sin embargo para las potencias de 1 y 2 mW existe una discrepancia bastante grande. Por este motivo se realizaron simulaciones numéricas variando un poco los parámetros de potencia de saturación y densidad óptica. Dichas simulaciones se muestran a continuación en las figuras 5.2-5.6.

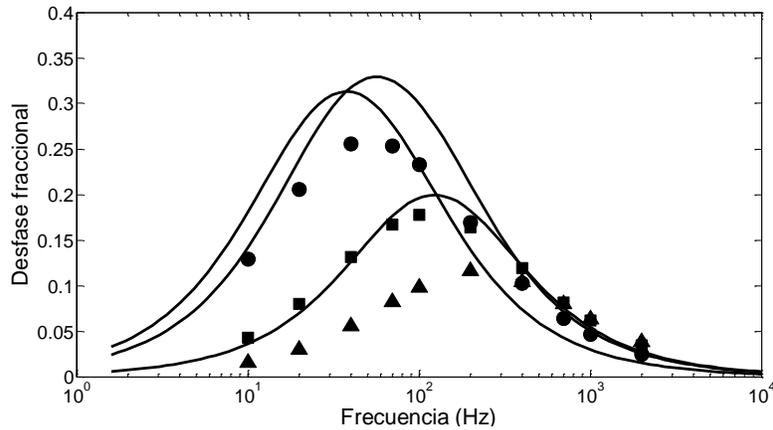


**Figura 5.1.** Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación para tres potencias promedio de entrada: 1mW-círculos, 2mW-cuadros, 3 mW-triángulos. Para la simulación numérica se utilizó una potencia de saturación=0.18 mW y una densidad óptica=11.4.

Primeramente se fijó una densidad óptica de 11.4 y se varió la potencia de saturación, eligiendo valores cercanos a los teóricos, 0.15 y 0.25 mW. En la figura 5.2 se puede ver que para una potencia de saturación chica, los valores experimentales de las potencias de entrada de 2.1 y 3.15 mW, exceden la curva teórica. Por otro lado, en la figura 5.3 se observa que para las potencias de entrada de 2.1 y 3.16 mW las curvas teóricas están muy por encima de los puntos experimentales.



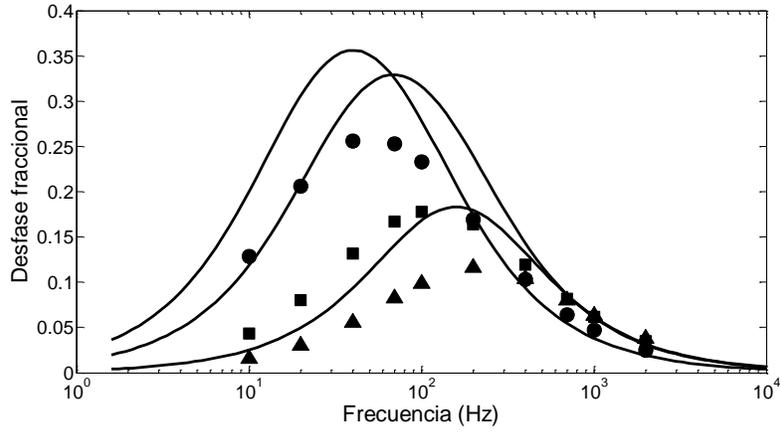
**Figura 5.2** Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación, para tres potencias promedio de entrada. Densidad óptica:11.4 y potencia de saturación:0.15 mW.



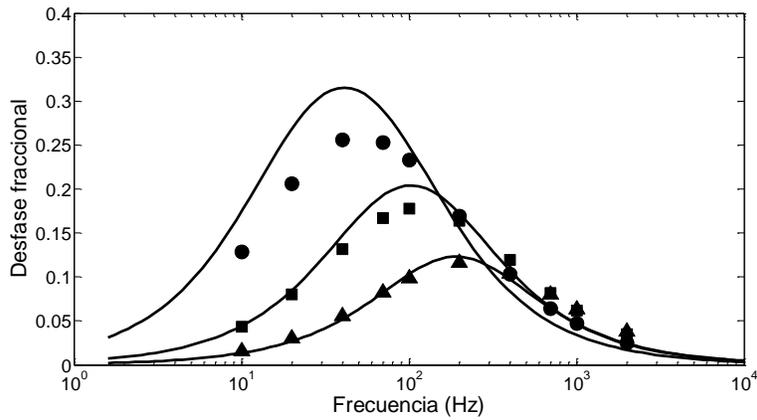
**Figura 5.3** Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación, para tres potencias promedio de entrada. Densidad óptica: 11.4 y potencia de saturación: 0.25mW.

Ahora se fijó una potencia de saturación de 0.2 mW (~0.18mW) y se varió la densidad óptica: 10 y 13. En las figuras 5.4 y 5.5 se puede observar que al cambiar la densidad óptica, las curvas teóricas se desplazan hacia arriba o hacia abajo. Para una densidad óptica de 13 las curvas teóricas muestran valores mucho mayores que los experimentales, sin embargo para una densidad de 10, ambos valores se acercan, haciendo una buena aproximación de la teoría con el experimento. Por esta razón se realizaron otras simulaciones numéricas para densidades ópticas más pequeñas: 8, 8.5 y 9 y para diferentes potencias de saturación. Se obtuvo la mejor aproximación de la teoría con el experimento para una densidad óptica de 8.5 y una potencia de saturación de 0.22 mW, ver figura 5.5.

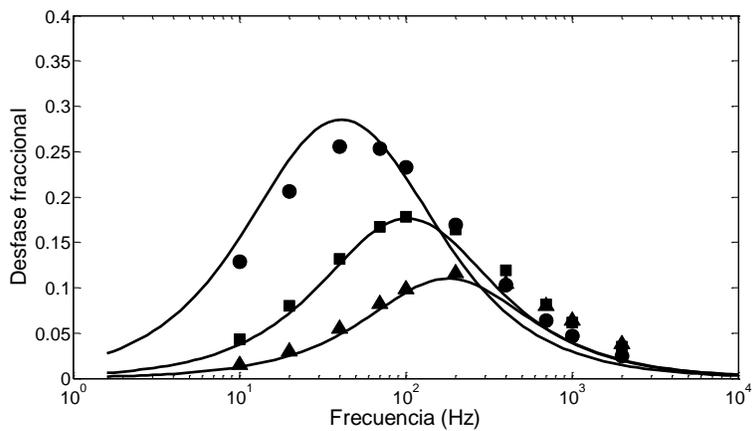
Después de haber encontrado una buena aproximación de la simulación numérica con los valores experimentales para el desfase de los pulsos de luz transmitidos en una fibra dopada con erbio, se prosiguió a estudiar el desfase de los pulsos pero ahora midiendo la señal de fluorescencia.



**Figura 5.4** Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación, para tres potencias promedio de entrada. Densidad óptica: 10 y potencia de saturación: 0.2mW.



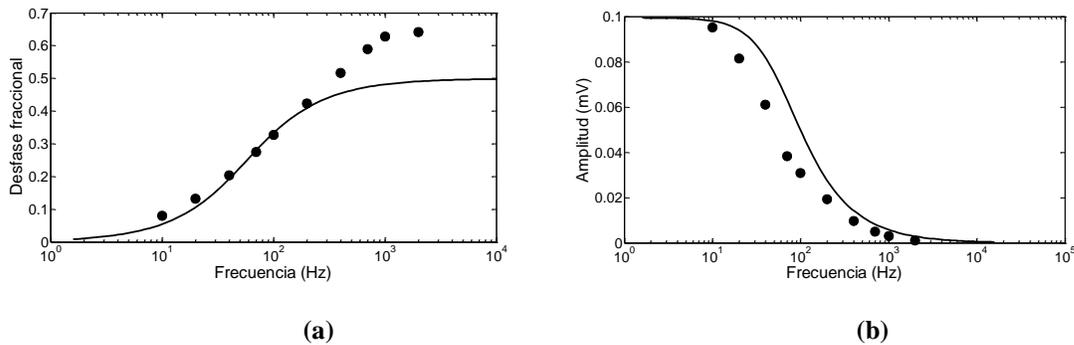
**Figura 5.5** Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación, para tres potencias promedio de entrada. Densidad óptica: 13 y potencia de saturación: 0.2mW.



**Figura 5.6** Desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación, para tres potencias promedio de entrada. Densidad óptica: 8.5 y potencia de saturación: 0.22 mW.

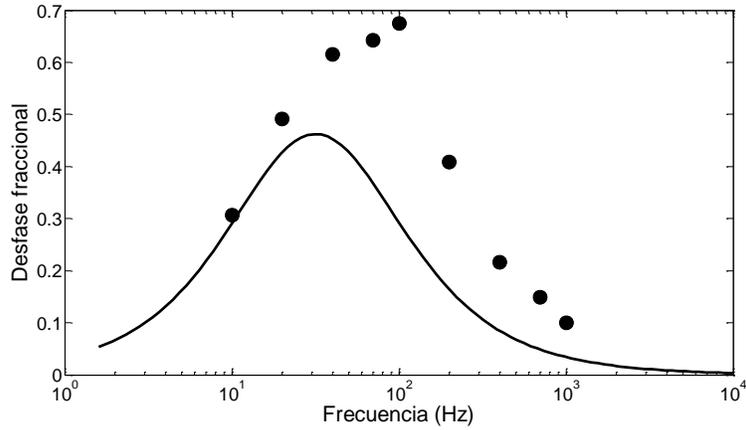
Se realizó la comparación teórica y experimental de la respuesta de la señal de fluorescencia al inicio de la fibra del desfase fraccional y la amplitud como función de la frecuencia de modulación. Para la simulación numérica se utilizaron los siguientes parámetros: potencia de saturación 0.2 mW y una densidad óptica de 11.4, obteniendo así la aproximación que se muestra en la figura 5.7- a y b.

Se puede ver en la gráfica 5.6-b, una buena aproximación de la teoría con los datos experimentales. Sin embargo en la 5.6-a, los puntos experimentales que corresponden a valores de altas frecuencias tienen una discrepancia. En la curva teórica, los puntos tienden a un valor constante de 0.5, mientras que los valores experimentales tienden a 0.65.



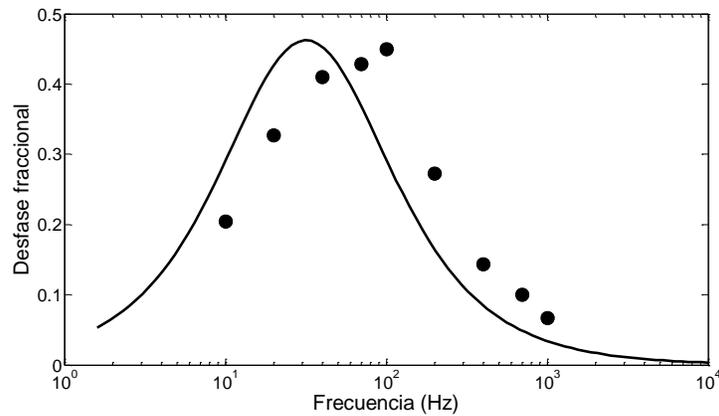
**Figura 5.7** Desfase fraccional (a) y Amplitud (b) de la señal de fluorescencia el inicio de la fibra como función de la frecuencia de modulación, para una potencia de entrada de 0.53 mW y una profundidad de modulación de 100 %.

A continuación se muestran las graficas con la curva teórica y los puntos experimentales de la señal de fluorescencia al final de la fibra de tres metros. La simulación numérica se comenzó con los valores de densidad óptica y potencia de saturación obtenidos en el laboratorio, la gráfica que se obtuvo se muestra en la figura 5.7.



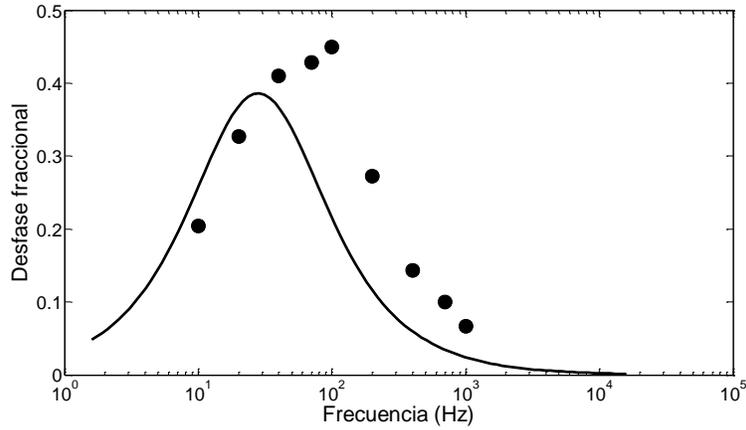
**Figura 5.7** Desfase fraccional de la señal de fluorescencia como función de la frecuencia de modulación al final de la fibra, con una potencia de entrada de 0.53 mW y una profundidad de modulación del 100%. Para la consideración teórica se utilizó una densidad óptica de 11.4 y una potencia de saturación 0.2 mW.

En la figura anterior se puede ver que los puntos experimentales están muy por encima de la curva teórica, por esta razón los valores experimentales fueron divididos entre un factor de 1.5, ver figura 5.8.

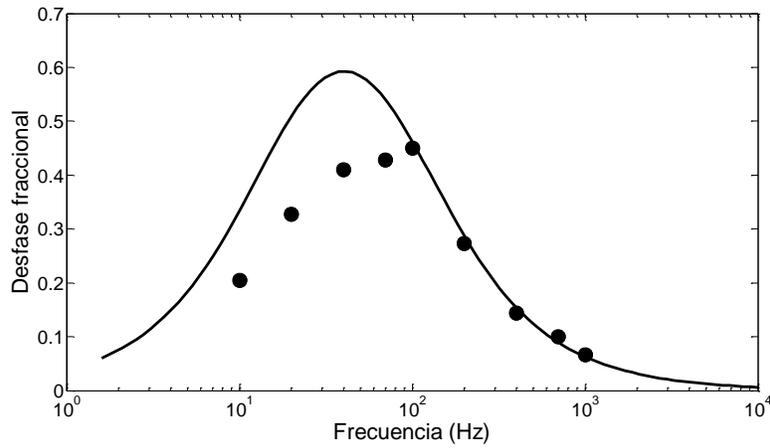


**Figura 5.8** Densidad óptica 11.4, potencia de saturación 0.2 mW.

Gracias al factor por el cual se dividió los puntos experimentales, ambas curvas se nivelaron a la misma amplitud. Por esta razón de aquí en adelante se todas las graficas fueron corregidas con dicho factor, para una mejor aproximación. En las figuras 5.9 y 5.10, se fijó una densidad óptica de 11.4 y se eligieron 2 potencias de saturación: 0.3 y 0.1 mW, valores cercanos al teórico (~0.2mW).

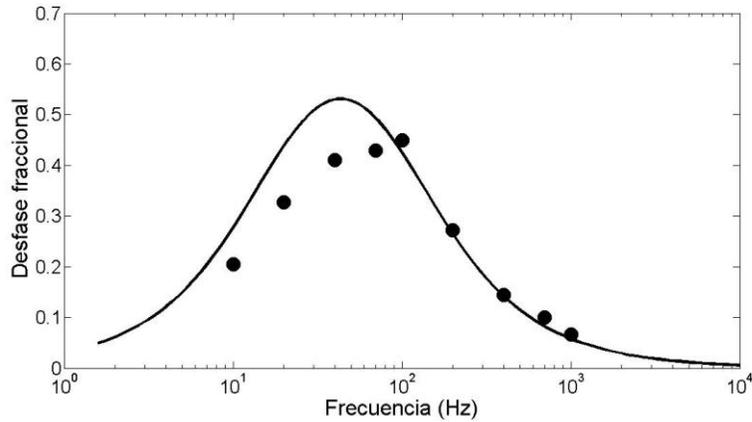


**Figura 5.9** Densidad óptica 11.4, potencia de saturación 0.3 mW.



**Figura 5.10** Densidad óptica 11.4, potencia de saturación 0.1 mW.

Se puede ver en la figura 5.9, que al utilizar una potencia de saturación de 0.3 mW, el máximo de la curva experimental está desplazada de la curva teórica a frecuencias mayores. Sin embargo al considerar una potencia de saturación menor, 0.1 mW, la curva experimental se desplazó hacia frecuencias menores, quedando prácticamente alineadas las dos curvas. Para que las amplitudes de las dos curvas fuesen similares, se mantuvo la misma potencia de saturación y se eligió un valor más pequeño para la densidad óptica. Con los parámetros mencionados (potencia de saturación: 0.1 y densidad óptica 8.5), se obtuvo una buena aproximación de la simulación numérica con el experimento.



*Figura 5.11 Densidad óptica 8.5, potencia de saturación 0.1 mW.*

## 5.2 Conclusiones parciales

- 1.- Se realizó una comparación de la simulación numérica, descrita en el capítulo 4, con los valores experimentales obtenidos en el laboratorio para el retraso de pulsos de luz transmitida y para pulsos de luz utilizando fluorescencia transversal.
- 2.- En la simulación numérica se variaron los parámetros de la potencia de saturación y densidad óptica, para encontrar los valores con los cuales se ajustan mejor las curvas teóricas con los valores experimentales.
- 3.- Se obtuvo un buen ajuste de la teoría y el experimento, para el caso en el cual se estudió cómo cambia el desfase fraccional de los pulsos de luz transmitidos con la frecuencia de modulación, al utilizar una densidad óptica de 8.5 y una potencia de saturación de 0.22 mW para la simulación numérica.
- 4.- Hubo una discrepancia grande entre la simulación numérica y los valores experimentales cuando trabajó con la señal de fluorescencia. Cuando se estudió el desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación de la señal, se observó que los valores experimentales estaban muy por encima de la simulación.

5.- Se obtuvo un mejor ajuste de la teoría y el experimento, al utilizar una potencia de saturación de 0.1 y una densidad óptica de 8.5 en la simulación numérica.

## Capítulo 6: Resultados principales y conclusiones del trabajo.

1.- Se desarrolló un sistema experimental de fibra óptica para la caracterización de la fibra dopada con erbio a una longitud de onda de 1526 nm. Se calculó la potencia de saturación,  $P_{\text{sat}}=0.18$  mW, la densidad óptica de la fibra,  $\alpha_0 L=11.4$ , así como el tiempo de relajación del estado metaestable,  $\tau_0=10$  ms de la fibra dopada con erbio, HG980.

2.- Se realizó un arreglo experimental para el estudio de la propagación de señales periódicamente moduladas en fibras dopadas con erbio con saturación óptica por medio de la detección de la potencia de luz transmitida y por medio de la fluorescencia transversal.

3.- Se estudió el desfase fraccional de una señal transmitida a través de una fibra dopada con erbio con respecto a la señal de entrada a la fibra. Se variaron parámetros tales como la longitud de la fibra, la potencia promedio de entrada, la profundidad y frecuencia de modulación sinodal.

3.1.- Existe una dependencia del desfase fraccional con la frecuencia de modulación (crecimiento inicial, el máximo y después decaimiento) que a su vez depende de la potencia promedio de entrada. Para tres potencias utilizadas se observó que el desfase fraccional disminuía con el aumento de la potencia, además, el efecto es más marcado para frecuencias en donde el desfase era máximo. La frecuencia a la que se daba el máximo desfase se desplazaba a frecuencias mayores con el aumento de la potencia.

3.2.- Se observó que el desfase fraccional aumenta con la longitud de la fibra, particularmente el efecto se acentúa para frecuencias de modulación que se acercan a la frecuencia a la que el desfase es máximo y disminuye con frecuencias mucho más grandes o chicas. Además se encontró que el desfase fraccional prácticamente no depende de la profundidad de modulación.

4.- Se desarrollo un arreglo experimental para investigar la propagación lenta de pulsos de luz utilizando fluorescencia transversal transitoria.

4.1.- Se estudió el desfase fraccional y la amplitud relativa de la señal de fluorescencia como función de la frecuencia de modulación. Se encontró que no existe dependencia entre la profundidad de modulación y el valor del desfase fraccional, sin embargo, hay una dependencia lineal entre la amplitud relativa y la profundidad de modulación.

4.2.- Se observó el cambio en la forma de la señal de fluorescencia al final de la fibra ante diferentes profundidades de modulación de la señal de entrada: entre mayor es la profundidad de modulación mayor es la deformación de la señal de fluorescencia.

4.3.- Se analizó la señal de fluorescencia a lo largo de la fibra variando parámetros como la potencia de entrada y frecuencia de modulación. Para todos los casos hubo un corrimiento de la señal de fluorescencia respecto a la señal de entrada con la longitud de la fibra y un crecimiento de la amplitud normalizada con el aumento de la distancia a lo largo de la fibra.

4.4.- Se realizaron mediciones al final de la fibra del desfase fraccional como función de la frecuencia de modulación para una potencia y profundidad de modulación fija como un análogo de mediciones similares de potencia transmitida.

5.- Mediante una simulación numérica realizada en Matlab, se estudió numéricamente la propagación de pulsos luz así como la señal de fluorescencia de dichos pulsos en una fibra óptica con la saturación óptica. Se encontró una similitud con los datos experimentales obtenidos en el laboratorio.

6.- Se realizó una comparación de los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio con los resultados teóricos mediante la simulación numérica para la propagación lenta de pulsos de luz transmitida y para pulsos de luz utilizando fluorescencia transversal transitoria. Para ambos casos se encontró un buen ajuste del experimento con la teoría.

## REFERENCIAS

- R. W. Boyd and D. J. Gauthier “Slow and Fast light”, in “*Progress in Optics Vol.43*” ed. by E. Wolf pp. 497-530 (Elsevier, 2002)
- Th. F. Krauss, “Why do we need slow light?” *Nature Photonics*, 2, 448-450 (2008).
- D. J. Gauthier, A. L. Gaeta, R. W. Boyd, “Slow light: from basis to future prospects”, *Photonics Spectra*, 44-50 (March 2006).
- Schweinsberg, N. N. Lepeshkin, M. S. Bigelow, R. W. Boyd, and S. Jarabo “Observation of superluminal and slow light propagation in erbium-doped optical fiber” *Europhys. Lett.* 73, 218-224 (2006).
- G. M. Gehring, A. Schweinsberg, Ch. Barsi, N. Kostinski, and R. W. Boyd „Observation of backward pulse propagation through a medium with a negative group velocity”, *Science* 312, 895-897 (2006).
- S. Melle, O. G. Calderon, F. Carreno, E. Cabrera, M. A. Anton, and S. Jarabo “Effect of ion concentration on slow light propagation in highly doped erbium fibers” *Opt. Commun.* 279, 53-63 (2007).
- C. Selden “Pulse transmission through a saturable absorber” *Br. J. Appl. Phys.* **18** 743-748 (1967).
- S. Stepanov and E. Hernandez Hernandez “Controllable propagation of light pulses in Er-doped fibers with saturable absorption” *Opt.Lett.* 33, 2242-2244 (2008).
- S. Stepanov and M. Plata “Slow and fast light via two-wave mixing in erbium doped fibers with saturable absorption” *Phys. Rev.* 80, 053830 (2009).
- S.E. Schwarz, T.Y. Tan “Wave interactions in saturable absorbers”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 10. No.1 pp. 4-7 (1967)

- P.C. Becker, N.A. Olsson, J.R. Simpson, “Erbium-Doped Fiber Amplifiers, fundamentals and Technology”, 1999, pp.99-120 .
- Casimer M. DeCusatis, “Fiber Optic Essentials”, 2006, pp 115-119.
- K. Thyagarajan, “Fiber Optics Essential”, 2007, pp 125-143
- B.E.A. Saleih, M.C. Teich, “Fundamentals of Photonics”, 2007, pp 184-189
- E. Siegman, “lasers”, 1986, pp 1-6.