

# Análisis de regímenes de onda continua y pulsado sobre nuevos esquemas láser basados en fibra óptica

## Analysis of continuous-wave and pulsed regimes on novel optical fiber lasers schemes

Juan Carlos Hernández-García\*, Julián Moisés Estudillo-Ayala\*, Baldemar Ibarra-Escamilla\*\*, Olivier Pottiez\*\*\*, Roberto Rojas-Laguna\*, José David Filoteo-Razo\*, Luis Fernando Sámano-Aguilar\*

### RESUMEN

Este artículo presenta los resultados experimentales obtenidos en el desarrollo de nuevas arquitecturas propuestas para láseres de fibra óptica operando en el régimen de onda continua y pulsado. El primer láser es un Q-switched activo operando a 1565 nm con fibra de doble revestimiento dopada con Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>, anchos de pulso del orden de cientos de ns, razón de repetición entre 200 kHz a 310 kHz, y potencia promedio de hasta 2.5 W. La segunda arquitectura es un láser de amarre de modo pasivo con generación de armónicos de orden superior. Las características de la salida son: longitudes de onda centrales de 1563 nm, pulsos de ruido con duraciones alrededor de 80 ns, evolución de armónicos de hasta el orden 1270, y tasas de repetición de 259 MHz. Los resultados presentados buscan proporcionar una comparación entre dos tipos de láseres de fibra óptica que resultan actualmente de gran interés tecnológico.

### ABSTRACT

This paper presents the experimental results obtained in the development of novel optical fiber lasers architectures operating in continuous-wave and pulsed regimes. The first laser shown is an actively Q-switched operating at 1565 nm with a double-clad fiber doped with Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>, pulse widths in the order of hundreds of ns, repetition rate from 200 kHz to 310 kHz, and average power up to 2.5 W. The second architecture is a passive mode-locked laser with higher harmonics generation. Output characteristics are: center wavelengths 1563 nm, noise-like pulses with durations around 80 ns, harmonics evolution up to the order 1270, and repetition rates to 259 MHz. The results presented seek to provide a comparison between two types of optical fiber lasers of great technological interest.

Recibido: 24 de junio de 2015  
Aceptado: 13 de octubre de 2015

#### Palabras clave:

Láseres de fibra óptica Q-switched; láseres de fibra óptica de amarre de modos; fibra de doble revestimiento dopadas con Erblio e Iterbio.

#### Keywords:

Q-switched fiber lasers; Mode-locked fiber lasers; Double-clad Erbium-Ytterbium doped fiber.

#### Cómo citar:

Hernández-García, J. C., Estudillo-Ayala, J. M., Ibarra-Escamilla, B., Pottiez, O., Rojas-Laguna, R., Filoteo-Razo, J. D., & Sámano-Aguilar, L. F. (2016). Análisis de regímenes de onda continua y pulsado sobre nuevos esquemas láser basados en fibra óptica. *Acta universitaria*, 26(NE-1), 12-16. doi: 10.15174/au.2016.841

### INTRODUCCIÓN

Actualmente, los láseres de fibra óptica son considerados dispositivos tecnológicos con un amplio campo de aplicación, desde el procesamiento de materiales en la industria, transmisión en comunicaciones ópticas, sensado remoto activo hasta intervenciones médicas. Las ventajas de este tipo de láseres con respecto a los denominados *láseres de estado sólido de bulbo* se centran en aspectos como la calidad de haz (dimensiones del orden de  $\mu\text{m}$ ), alta eficiencia, compactes del sistema, excelente disipación de calor y alta economía en su mantenimiento (costo casi nulo).

Los sistemas láser de fibra óptica, que basan su etapa de amplificación en fibras de doble revestimiento dopadas con tierras raras (González-García *et al.*, 2013), resultan de gran interés para aplicaciones de alta potencia, cuya operación puede darse tanto en el régimen de onda continua (CW) como en el régimen pulsado. Un ejemplo de este tipo de arquitectura de desarrollo son

\* División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca (DI-CIS), Universidad de Guanajuato. Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8 Km, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Gto., México, C.P. 36885. Tel.: (464) 6479940, ext. 2418; fax 2311. Correo electrónico: jchernandez@ugto.mx

\*\* Departamento de Óptica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), L. E. Erro 1, Puebla, Puebla, México, C.P. 72000.

\*\*\* Centro de Investigaciones en Óptica (CIO). Loma del Bosque 115, Col. Lomas del Campestre, León, Gto., México, C.P. 37150.

los llamados *láseres de fibra óptica del tipo Q-switched*, cuya salida es denominada en ocasiones como *pulsos gigantes*. Existen diversas técnicas para lograr la operación mediante el *Q-switched* en un láser de fibra, una de éstas se basa en el uso de cristales como absorbedores saturables, recibiendo el nombre de *láseres Q-switched pasivo* (Laroche, Chardon, Nilsson, Shepherd & Clarkson, 2002). La técnica que se presenta en el desarrollo de este trabajo recae en el uso de una modulación externa proveída por un elemento electrónico, en este caso un modulador acusto-óptico (*Acousto-Optic Modulator [AOM]*); a este tipo de arquitecturas se les denomina *láseres Q-switched activos* (Pérez-Millán, Cruz & Andrés, 2005).

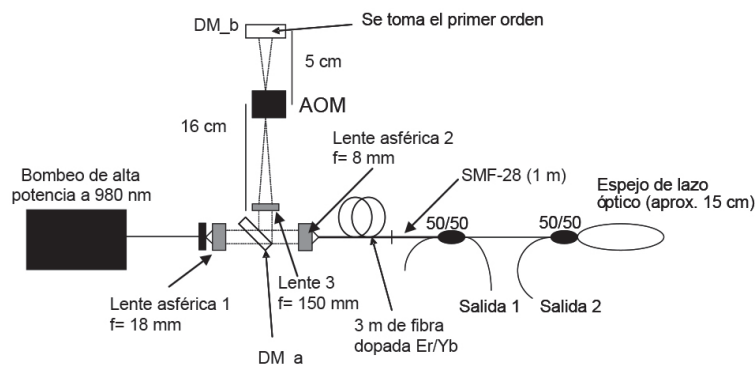
Al igual que las clasificaciones descritas previamente, resulta de gran interés el estudio de esquemas láser que son capaces de trabajar en ambos regímenes de operación (CW y pulsado), y además pueden producir un tipo específico de salida conocido como *pulsos de ruido*. Éstos son una amplia y compacta serie de miles de pulsos ultracortos (órdenes de ps o sub-ps) en el interior del pulso generado por el láser; sus características son: su amplitud y duración varía aleatoriamente, observándose por lo regular en láseres con una cavidad larga (km) de fibra en cualquier régimen de dispersión. El caso de estudio en este trabajo es un láser clasificado como láser de amarre de modos pasivo (es decir, no utiliza un elemento electrónico externo para el proceso de generación del régimen pulsado); ejemplos de este tipo de arreglos los encontramos en esquemas nombrados *láser de figura ocho* (Duling, 1991) y *de cavidad de anillo* (Matsas, Richardson, Newson & Payne, 1993). Para este tipo de láseres se aprovechan las ventajas actuales de encontrar diodos de bombeo de alta potencia, la tecnología de doble revestimiento y el entendimiento de la dinámica de los solitones disipativos (Grelu & Akhmediev, 2012), tal es el caso que se han logrado

avances en generación de pulsos de alta energía, generando armónicos de orden superior en la cavidad láser (rangos de GHz o mayores).

Este trabajo de forma general busca presentar los resultados obtenidos en dos distintas arquitecturas de láseres de fibra óptica desarrolladas de forma experimental. Se muestra la salida en ambos regímenes de operación con el fin de estudiar, analizar y ejemplificar el comportamiento para un láser del tipo *Q-switched* activo y un láser de amarre de modos pasivo. Las arquitecturas propuestas actualmente aportan diversos puntos de interés que permiten ejemplificar las posibles aplicaciones, así como el funcionamiento de este tipo de dispositivos.

## Esquemas experimentales

La figura 1 muestra el arreglo experimental del láser *Q-switched* activo. Este esquema se basa en la combinación de una señal de bombeo operando a 980 nm, y una longitud de onda del láser de 1565 nm. Se tiene una cavidad Fabry-Perot dentro de la cual se inserta una sección compuesta por un modulador AOM. Existe un espejo dicróico (DM\_b) y un elemento de fibra óptica que funcionan como espejo de lazo óptico, formando los extremos de la cavidad del láser. El espejo de lazo óptico se compone de una sección de 15 cm fibra *Single-Mode Optical Fiber (SMF-28)*, por sus siglas en inglés) empalmados a un acoplador 50/50. El medio de ganancia consta de 3 m de fibra de doble revestimiento, la cual está dopada con  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ , tiene un diámetro de 6  $\mu\text{m}$  para el núcleo, 130  $\mu\text{m}$  para el primer revestimiento y 245  $\mu\text{m}$  para el revestimiento externo. La fibra de doble revestimiento se fusionó a 1 m de fibra estándar con la finalidad de atenuar la señal de bombeo residual y la señal de 1064 nm debido a la emisión del Iterbio.



**Figura 1.** Esquema experimental del láser tipo *Q-switched* activo.  
 Fuente: González-García et al. (2013).

El láser cuenta con una etapa de inserción de la señal de bombeo (980 nm) compuesta por la combinación de lentes esféricas (figura 1), así como con lentes que permiten una correcta alineación del AOM. El *Dichroic Mirror\_a* (DM\_a) mostrado en la figura cuenta con una reflectividad mayor a 99.5% a 1550 nm y una transmisión mayor a 90% a 1064 nm, esto para un ángulo de 45°. La señal de bombeo se acopló dentro de la fibra de doble revestimiento con la ayuda de un sistema manual de posicionado XYZ, realizando previamente un corte a 7.5° para la fibra dopada con el propósito de evitar reflexiones.

La figura 2 muestra el láser de amarre de modos pasivo que se estudia en este trabajo. Por el tipo de configuración se denomina *láser de anillo*; consta de 4 m de fibra de doble revestimiento con características similares a las usadas en el esquema anterior, pero con un diámetro del núcleo de 10 μm. Esta fibra se bombeó a 980 nm mediante un diodo láser de alta potencia con salida de fibra óptica. Se utilizó, además, un combinador de bombeo-sígnal, un aislador de bulo y un carrete de fibra SMF-28 de 1 km para formar la cavidad láser. El arreglo también incluye dos controladores de polarización (PC, por sus siglas en inglés), además de tres acopladores (dos 99/01 y uno 90/10) que permiten monitorear la señal obtenida.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el primer esquema de estudio, el perfil de la emisión espontánea de la fibra dopada cubre un rango de longitud de onda que abarca de los 1525 nm a los 1570 nm; esto permite que el láser desarrollado sea capaz de operar dentro de la región. Es importante hacer notar que se utilizó el orden uno para realizar la alineación en la etapa que contiene el AOM, lo cual se determinó debido a que la salida resultó ser más estable. Los resultados experimentales presentados en la figura 3 muestran la operación del láser para el régimen CW; en este caso se puede observar que la longitud de onda central se encuentra cercana a los 1565 nm, mientras que la potencia promedio obtenida está alrededor de los 2 W dentro de la cavidad.

El régimen pulsado es analizado variando la frecuencia de los 200 kHz a los 310 kHz en el AOM. En la figura 4 muestra que existe una variación del ancho de los pulsos obtenidos que se traduce en un cambio de anchura del espectro mostrado, mientras que la duración de los pulsos se observó entre los 150 ns – 350 ns, la potencia promedio máxima obtenida en este régimen fue de 2.5 W. Las características de operación de este tipo de láseres, como las altas tasas de repetición y altas potencias de salida, muestran por qué son mayor-

mente utilizados en las aplicaciones para procesamiento de materiales, medicina, entre otras. Para este caso de estudio se tiene una eficiencia láser del ~27%, sin embargo han logrado conseguir eficiencias que llegan hasta el 50% (González-García *et al.*, 2013), lo que demuestra que este tipo de esquemas pueden seguir optimizándose con la finalidad de ser aplicados en diversas áreas de interés.

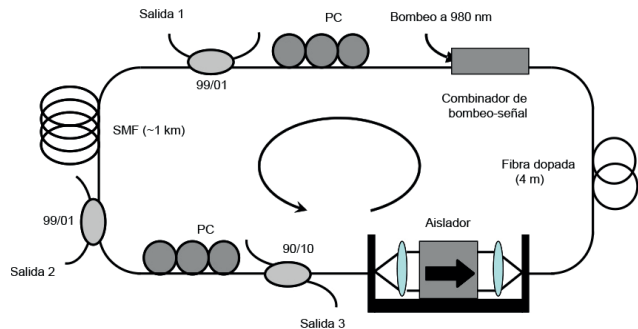


Figura 2. Esquema experimental del láser de amarre de modos pasivo. Fuente: Pottiez *et al.* (2014).

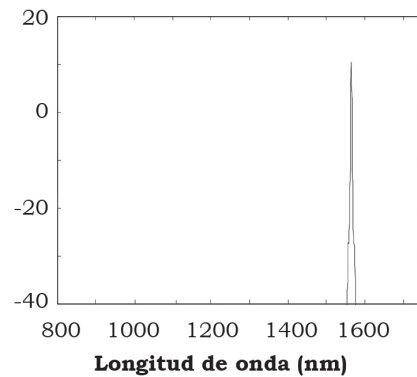


Figura 3. Láser Q-switched activo operando en el régimen CW. Fuente: Elaboración propia.

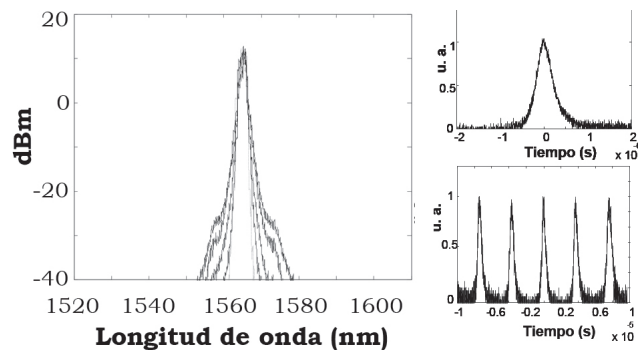


Figura 4. Láser Q-switched activo operando en el régimen pulsado mediante una variación de la frecuencia del AOM. Fuente: Elaboración propia.

En el láser de amarre de modos pasivo de la figura 2 se acoplaron experimentalmente hasta 2 W de potencia de bombeo dentro de la fibra dopada; la limitante en este caso fue el empalme entre la salida del combinador de bombeo-señal y la fibra de doble revestimiento. El empalme se realizó con un equipo que no está especializado en trabajar con el nuevo tipo de fibras dopadas utilizadas, sin embargo esto no influyó de gran manera en los resultados obtenidos. Se tiene, entonces, que para ajustes de los *Polarization controllers* (PC) incluidos en el esquema, el amarre de modos puede obtenerse a través de la evolución de la polarización no lineal y mediante la selección de una polarización determinada (Matsas *et al.*, 1993), comenzando a presentarse con una potencia de bombeo alrededor del 10% de la potencia máxima. Si la potencia de bombeo incrementa y se ajustan los PC, los armónicos de órdenes más altos se logran observar, resultando interesante observar que el amarre de modos se auto-enciende en todos los casos.

Las mediciones del amarre de modos fundamental se muestran en la figura 5; se observa un tren de pulsos muy estable con un periodo de 4.9  $\mu\text{s}$  (razón de repetición de 204 kHz). La duración de los pulsos es de varios ns y crece conforme aumenta la potencia de bombeo, alcanzando un valor máximo de 80 ns; al medir la función de autocorrelación se observó una estructura de doble escala con un pico de coherencia de 2 ps. Este tipo de características son típicas para pulsos de ruido (Pottiez *et al.*, 2014). Se observó que el amarre de modos fundamental está restringido a valores bajos de potencia de bombeo, en este caso valores de potencia promedio no mayores a 25 mW (1.2  $\mu\text{J}$  dentro de la cavidad). En la parte espectral aparece (asociado con un fondo temporalmente extendido) un pequeño pico sobre la señal, el cual se debe a una componente CW ligeramente desplazada del centro del espectro del pulso. El mecanismo descrito se propuso para explicar la sincronización espontánea de varios cientos de solitones interactuando dentro del láser (Ilday, Buckley, Clark & Wise, 2004); un proceso similar se presenta en el esquema láser propuesto, donde un amplio rango de interacciones repulsivas ocurren en el pulso de ruido.

Conforme la potencia de bombeo aumenta, el pulso de 80 ns se divide dentro de múltiples pulsos, resultando que en la mayoría de los casos para ligeros ajustes de los PC toma solamente unos pocos segundos para que el tren de pulsos uniformemente distribuido vuelva a surgir. Ordenes de armónicos 2 hasta 48 (tasas de repetición de los 0.4 MHz a los 9.7 MHz) son fácilmente obtenidos, mientras que el orden aumenta a medida que la potencia de bombeo aumenta hasta el 50% de su valor máximo. La figura 6 muestra algunos

ejemplos de los armónicos de más alto orden obtenidos, observando que cuando la potencia de bombeo aumenta hasta valores cercanos al máximo, se tienen dos regímenes adicionales, caracterizados por ser armónicos de muy alto orden, en este caso 673 y 1270. El tren de pulsos generado alcanza frecuencias de repetición de 137 MHz y 259 MHz, respectivamente, mientras que estos dos regímenes se estabilizan de forma más rápida.

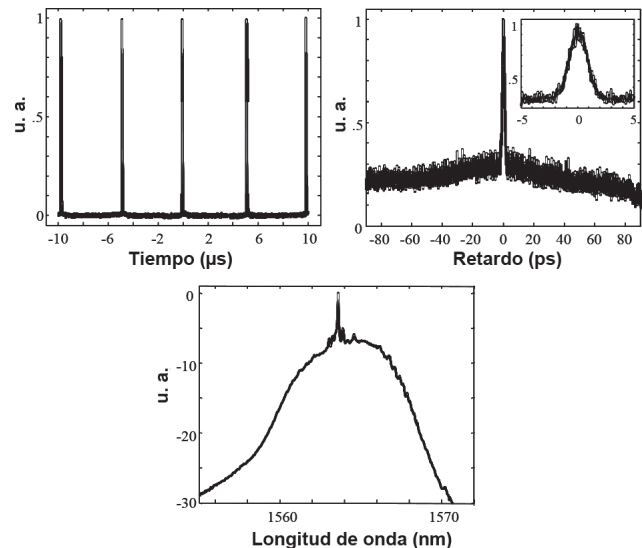


Figura 5. Resultados del láser de amarre de modos pasivo operando con el armónico fundamental.

Fuente: Pottiez *et al.* (2014).

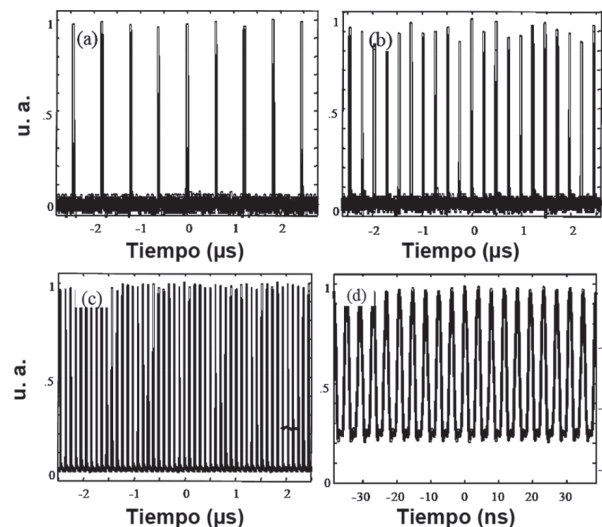


Figura 6. Armónicos de alto orden generados en el láser de amarre de modos pasivo. Fuente: Pottiez *et al.* (2014).

## CONCLUSIONES

Se observan de forma experimental los diversos comportamientos para dos arquitecturas de láseres de fibras ópticas. El uso de la fibra de doble revestimiento dopada con  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  como medio de ganancia permitió la obtención de resultados interesantes en el estudio de los esquemas de fibra óptica. El primer arreglo experimental fue capaz de generar potencias promedio de hasta 2.5 W, mostrando que mediante las mejoras correspondientes pueden alcanzarse potencias de más de 4 W, lo que representa una eficacia de hasta el 50%.

Para el segundo esquema, el estudio de la generación de pulsos de ruido con una alta tasa de repetición se logró mediante la evolución no lineal de polarización. En el funcionamiento del láser se observó primero un solo pulso de ruido a potencias moderadas, mientras que para potencias más altas este pulso se esparce dentro de pulsos múltiples. Por medio de la potencia de bombeo y un ajuste en los PC se puede apreciar la evolución de los armónicos en el amarrado de modos, logrando órdenes hasta de 1270. Estos resultados podrían ser de utilidad en la búsqueda de altas energías y altas tasas de repetición para láseres de amarrado de modos pasivo.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), mediante las cátedras

para jóvenes investigadores, proyecto núm. 3155, además del soporte de los proyectos núms. 104551 y 130681.

## REFERENCIAS

- Duling III, I. N. (1991). All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror. *Optics Letters*, 16(8), 539-541.
- González-García, A., Ibarra-Escamilla, B., Pottiez, O., Kuzin, E. A., Maya-Ordoñez, F., Durán-Sánchez, M., Deng, C., Haus, J. W., & Powers, P. E. (2013). High efficiency, actively Q-switched Er/Yb fiber laser. *Optics & Laser Technology*, 48, 182-186.
- Grelu, Ph., & Akhmediev, N. (2012). Dissipative solitons for mode-locked lasers. *Nature Photonics*, 6, 84-92.
- Ilday, F. O., Buckley, J. R., Clark, W. G., & Wise, F. W. (2004). Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser. *Physical Review Letters*, 92(21), 1-4.
- Laroche, M., Chardon, A. M., Nilsson, J., Shepherd, D. P., & Clarkson, W. A. (2002). Compact diode-pumped passively Q-switched tunable Er-Yb double-clad fiber laser. *Optics Letters*, 27(22), 1980-1982.
- Matsas, V. J., Richardson, D. J., Newson, T. P., & Payne, D. N. (1993). Characterization of a self-starting, passively mode-locked fiber ring laser that exploits nonlinear. *Optics letters*, 18(5), 358-360.
- Pérez-Millán, P., Cruz, J. L., & Andres, M. V. (2005). Active Q-switched distributed feedback erbium-doped fiber lasers. *Applied Physics Letters*, 87(1), 1-4.
- Pottiez, O., Hernández-García, J. C., Ibarra-Escamilla, B., Kuzin, E. A., Durán-Sánchez, M., & González-García, A. (2014). High-order harmonic noise-like pulsing of a passively mode-locked double-clad Er/Yb fibre ring laser. *Laser Physics*, 24(11), 1-8.