



# Inducción de Caos a Través de la Corriente de Inyección en un Diodo Láser

M. Reyes, E. Solarte

Grupo de Óptica Cuántica, Universidad del Valle, A. A. 25360, Santiago de Cali, Colombia

Recibido 22 de Oct. 2007; Aceptado 15 de Oct. 2008; Publicado en línea 5 de Ene. 2009

## Resumen

Se estudió el comportamiento caótico de un circuito no lineal R-L-Diodo y a su vez se modeló el comportamiento no lineal del diodo para contrastar cualitativamente las curvas medidas con las predichas. Con una señal sinusoidal se alimentó el circuito R-L- Diodo, para observar el desdoblamiento del período a causa de la variación de la frecuencia de la señal de entrada, manteniendo constante la amplitud. Luego se midió el voltaje de salida sobre la resistencia y se observó el fenómeno de bifurcación para 2, 4 y 8 períodos, hasta llegar a un comportamiento caótico para un amplio rango de frecuencias. El voltaje que cae sobre la resistencia del circuito R-L-Diodo se acondicionó por medio de un sistema de amplificadores para producir la señal de bombeo en un diodo láser y se estudió su respuesta luminosa en la región de frecuencias en la que el circuito R-L-Diodo se vuelve caótico

**Palabras claves:** Caos, Bifurcaciones, Diodo Láser, Circuitos no lineales, Acoplamiento de señal

## Abstract

The chaotic behavior of a non-linear R-L-Diode circuit has been studied. The non-linear behavior of the diode was modeled to compare the measured curves with the predicted ones. Period unfolding was observed by feeding the R-L-Diode circuit with a sinusoidal signal, varying the frequency and holding constant the amplitude of the input signal. The output voltage was measured on the resistor and bifurcation phenomenon was observed for 2, 4 and 8 periods and for a wide range of frequencies, before reaching the chaotic behavior. The voltage drop on the resistor was used as a source, and coupled to a diode laser excitation circuit. This signal has been coupled to the laser circuit using operational amplifiers to secure the extinction of noises, to provide the adequate signal level and to couple the circuit impedances. The laser response was studied as a function of output signal of the R-L-Diode circuit, especially where it becomes chaotic.

**Keywords:** Chaos, bifurcation, laser diode, non linear circuits, R-L-Diode, signal conditioning.

© 2009 Revista Colombiana de Física. Todos los derechos reservados.

## 1. Introducción

La dinámica caótica en sistemas ópticos ha sido considerada con interés en el último decenio debido a sus aplicaciones potenciales en telecomunicaciones: el caos óptico puede ser utilizado para enviar mensajes codificados. No existe una definición única de sistema dinámico caótico [1], pero cualquier comportamiento complejo de un sistema tal, se refleja en la existencia de múltiples soluciones periódicas en cualquier porción pequeña del espacio en el que las variables

dinámicas toman sus valores. Además, se encuentra que soluciones, que tienen condiciones iniciales muy cercanas, presentan comportamientos muy distintos y toman valores muy diferentes a lo largo de la evolución del sistema. Finalmente, para condiciones iniciales dadas, se encuentra que a medida que el tiempo pasa, las variables dinámicas del sistema pueden tomar cualquier valor cercano a cualquiera de los posibles en la región en la cual la variable puede tomarlos. Más exactamente, puede decirse que un sistema dinámico presenta comportamiento caótico cuando sus

trayectorias en el espacio de fases permanecen dentro de una cierta región, llenándola sin un orden geométrico definido y presenta sensibilidad a las condiciones iniciales [2]. En este trabajo se ha empleado un circuito RL-Diodo, construido con una resistencia,  $R = (220 \pm 0,05) \Omega$ , una inductancia,  $L = (2 \pm 0.01) \text{ mH}$ ., y un diodo 1N4001 en serie, con una fuente de alimentación sinusoidal, que conforma un sistema simple que presenta comportamiento caótico [3, 4, 5], para modular la corriente de inyección de un diodo láser, con el propósito de inducir luz láser con comportamiento caótico.

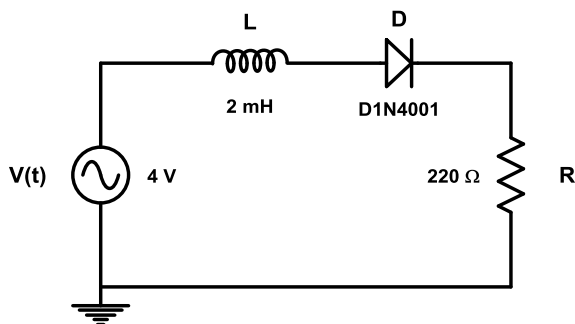
**2. Consideraciones Teóricas**

Considérese el circuito de la Fig.1; el diodo puede simularse con un condensador y una resistencia en paralelo [6], como se presenta en la Fig. 2.

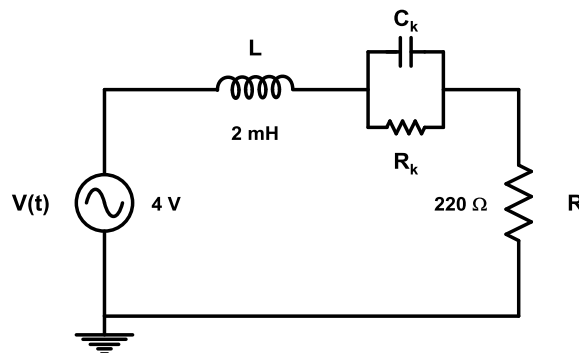
El comportamiento de este sistema muestra que para voltajes de polarización mayores a un cierto  $V_0$ , el diodo conduce, presentando una cierta resistencia  $R_2 = 1/G_2$  y una capacitancia  $C_2$ . Para voltajes menores o en polarización inversa, el diodo no conduce, la corriente del circuito es cercana a cero y el diodo trabaja como un RC paralelo con una cierta capacitancia  $C_1$  y una resistencia  $R_1$  infinita, o  $G_1=0$ . Si  $Q$  es la carga del condensador e  $I$  la corriente que circula en el circuito y el sistema se alimenta con una señal alterna de amplitud  $V$  y frecuencia  $\omega$ ; las leyes de Kirchoff para el circuito equivalente llevan a las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{G_k}{C_k}(Q - Q_0) + I \tag{1}$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{1}{L \cdot C_k}(Q - Q_0) - \frac{R}{L} I + \frac{(V \cos(\omega \cdot t) - V_0)}{L} \tag{2}$$



**Fig. 1** Esquema del circuito RL-Diodo



**Fig. 2** Circuito RL- D con el equivalente al diodo

Donde el índice  $k$  separa los casos no conduce (1) y conduce (2). Definiendo un vector  $X(t)$ , que contenga las variables del sistema, en la forma:

$$X(t) = [Q(t) - Q_0(t) \quad I(t)] \tag{3}$$

El sistema de ecuaciones se puede escribir en la forma:

$$\frac{dX}{dt} = \begin{bmatrix} -G_k & 1 \\ C_k & -R \\ LC_k & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q - Q_0 \\ I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ V \cos \omega t - V_0 \\ L \end{bmatrix} \tag{4}$$

Que puede abreviarse como:

$$\frac{dX}{dt} = A_k X(t) + B_k \tag{5}$$

La solución se encuentra en la forma:

$$X(t) = X_{sk}(t) + e^{A_k(t-t_0)}(X(t_0) - X_{sk}(t_0)) \tag{6}$$

Siendo:

$$X_{sk}(t) = c_k \cos(\omega \cdot t) + d_k \text{sen}(\omega \cdot t) + e_k$$

**2. Observación del Comportamiento Complejo**

Se observó doblamiento de periodo en la señal de salida del circuito RL-Diodo, se utilizó un generador de frecuencia, se mantuvo la señal sinusoidal de entrada con amplitud fija y se barrió la frecuencia; se tomó la caída de voltaje en la resistencia como señal de salida. Los diagramas de fase se observaron en la pantalla de un osciloscopio, tomando la señal de salida en el eje vertical y la entrada en el horizontal. En la Figuras 3 y 4 se presentan diagramas típicos con uno y tres periodos. Se observaron hasta 6 periodos antes de la irrupción del caos. El parámetro de control del sistema es la frecuencia de la señal de entrada.

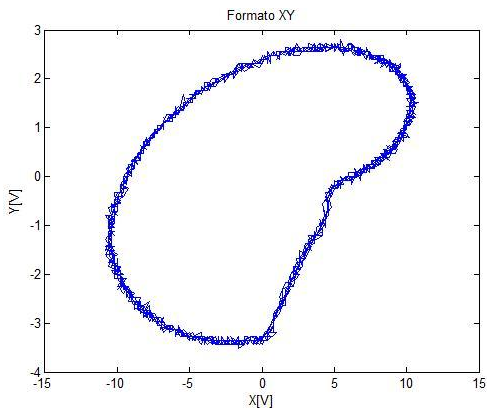
**3. Inducción de Caos en un Diodo Láser**

La señal de salida del circuito RL-D se utilizó para modular la corriente de inyección de un diodo láser. Debido a la diferencia de impedancias y a los requerimientos de poten-

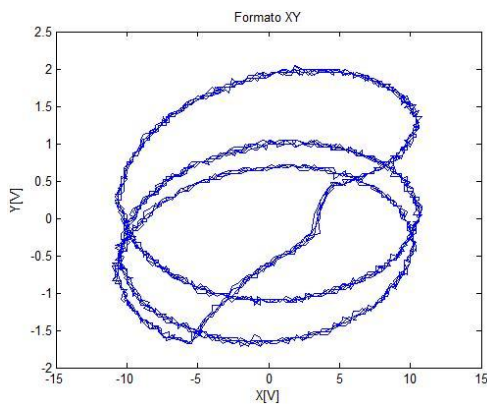
cia, se diseñó una etapa de amplificación y acople, considerando también los rangos de amplitud de las señales y el ancho de banda utilizado. Así, un diodo láser bombeado eléctricamente con la señal acondicionada de un circuito RL-Diodo, produce luz láser caótica. Se midió la salida luminosa del diodo láser usando un fotodiodo rápido cuya señal convertida en voltaje fue medida mediante un osciloscopio Tektronix TDS 200b. Los diagramas fueron generados llevando la señal del detector de luz a las placas verticales y el generador de señales a las horizontales. En las figuras 5 y 6 se presentan diagramas típicos.

#### 4. Conclusiones

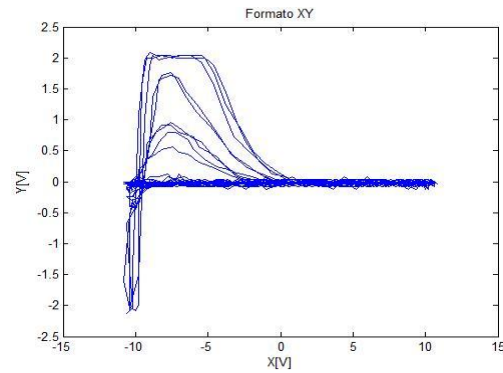
Se encontraron bifurcaciones y se observó caos para un amplio rango de frecuencias en el orden de los KHz en un sistema electrónico no lineal muy simple, RL-Diodo. Este sistema permitió inducir por inyección efectos de caos en un diodo láser.



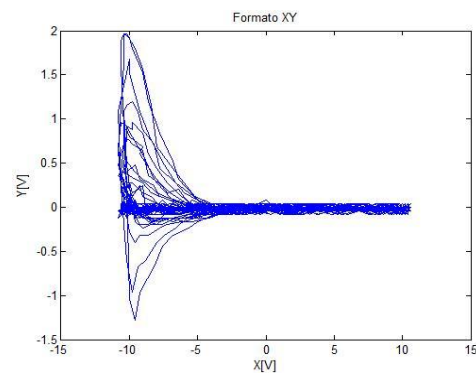
**Fig. 3** Diagrama medido con un periodo, para la frecuencia de 67.05 KHz



**Fig. 4** Diagrama medido con tres periodos, para la frecuencia de 122.83 KHz.



**Fig. 5** Diagrama medido para la señal luminosa del diodo láser con tres periodos a la frecuencia de 127.9 KHz



**Fig. 6** Diagrama medido para la señal luminosa del diodo láser mostrando caos a la frecuencia de 171.3 KHz.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen a la Universidad del Valle, a las Vicerrectorías de Investigaciones y Bienestar, a la Facultad de Ciencias y al Depto. de Física el apoyo para realizar este trabajo.

#### Referencias

- [1] Richard A. Holmgren, "A First Course in Discrete Dynamical System". 2<sup>nd</sup> Ed., Springer Verlag, New York, 1996
- [2] Diógenes Campos R y José Fernando Isaza D. "Prolegómenos a los sistemas dinámicos". Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2002
- [3] P. S. Linsay, "Period Doubling and Chaotic Behavior in a Driven Anharmonic Oscillator" Phys. Rev. Lett. **47**; pp. 1349-1352, 1981.
- [4] A. Azzouz, M. Hasler, "Orbits of the R-L-Diode Circuit". IEEE On Circuits and Sys. Vol **37**; pp. 1330-1339, 1990
- [5] K. Murali, M. Lakshmanan, L. O. Chua, "The Simplest Dissipative Nonautonomous Chaotic Circuit". IEEE Trans. On Circuits and Sys. Vol **41**; pp. 462-463, 1994
- [6] R. W. Rollins, E.R Hunt, "Exactly Solvable Model of a Physical System Exhibiting Universal Chaotic Behavior". Phys. Rev. Letters, **49**; pp. 1295-1298, 1982