

---

# Inducción De Caos En Intensidad Por Modulación De Corriente De Bombeo En Un Diodo Láser

Mauricio Reyes H. y Efraín Solarte

*<sup>a</sup> Grupo de Óptica Cuántica, Depto. de Física, Universidad del Valle, A. A. 25360, Cali, Colombia.*

---

## RESUMEN

Se estudió el comportamiento caótico de un circuito no lineal RL-Diodo y se modeló el comportamiento no lineal del diodo, para contrastar cualitativamente las curvas medidas con las predichas. Con la intención de observar desdoblamiento del período se alimentó el circuito RL-Diodo con una señal sinusoidal, la frecuencia de la señal de entrada se utilizó como parámetro del sistema y se mantuvo constante la amplitud de la señal. Como señal de salida se tomó el voltaje sobre la resistencia y se observó el fenómeno de bifurcación para 2, 4 y 8 períodos, hasta llegar al comportamiento caótico. El voltaje de salida del circuito RL-Diodo se acondicionó utilizando una etapa de atenuación de ruido, amplificación y acople de impedancias para ser usado como modulación en el circuito de inyección de un diodo láser. Se observó la repuesta de salida luminosa del láser en función de la frecuencia de alimentación del circuito RL-Diodo y se llevó el sistema hasta el régimen caótico. La señal luminosa del láser se captó por medio de un fotodiodo y se midió utilizando un osciloscopio. Se observó la aparición de bifurcaciones y la irrupción de caos en la salida del diodo láser.

**Palabras Clave:** Caos, bifurcación, diodo láser, RL-Diodo, Acoplamiento.

## 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, R-L-Diode, signal conditioning.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La dinámica caótica producida en sistemas ópticos tiene considerable atención por sus aplicaciones potenciales en telecomunicaciones en especial en codificación de comunicaciones ya que el caos óptico puede ser usado para enmascarar los mensajes transmitidos entre un emisor-receptor. El estudio de los fenómenos caóticos es una amplia parte de la teoría de sistemas dinámicos no lineales, el nacimiento de esta ciencia se remonta a la segunda mitad del siglo XVII cuando Newton inventó el cálculo diferencial, las leyes del movimiento y la teoría de la gravedad. Los físicos han creído que las soluciones periódicas son suficientes para describir los comportamientos oscilatorios de los sistemas dinámicos; Henri Poincaré, a finales del siglo XIX, mostró que leyes dinámicas simples pueden conducir a comportamientos muy complejos que se llaman comportamientos caóticos. No hay una única definición para un sistema dinámico caótico pero, en todo caso, el comportamiento complejo del sistema se refleja en la existencia de puntos periódicos en cualquier pequeña porción del espacio en el que toma valores la variable; la existencia de alta sensibilidad a las condiciones iniciales, y con el paso del tiempo, la función de salida (respuesta) del sistema toma valores muy cercanos a cualquiera de los valores que puede tomar la variable.

El circuito electrónico RL-Diodo es un buen ejemplo de un sistema que puede exhibir comportamiento caótico y la construcción de este circuito permite entender la matemática y los usos de este fenómeno. En este trabajo se ha montado un circuito RL-Diodo, que fue llevado hasta el régimen caótico. La señal producida por este sistema se empleó para

inducir caos en un diodo láser por inyección de corriente, con este trabajo se pretende contribuir a la construcción de sistemas de comunicación seguros.

## 2. COMPORTAMIENTO DE UN CIRCUITO RL-DIODO

Considérese un circuito RL-Diodo, el esquema para el caso de un circuito formado por una fuente, una resistencia, una inductancia y un diodo se modeló el diodo como un condensador con una resistencia en paralelo, como se muestra en la figura 1.

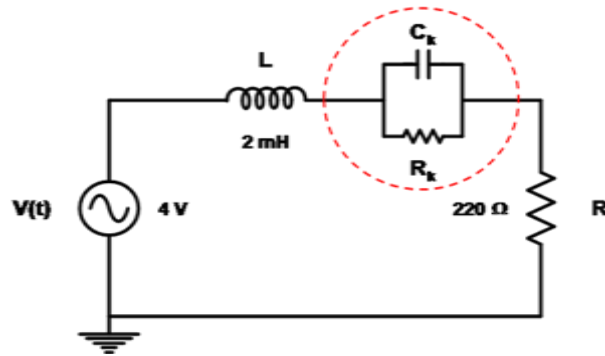


Figura 1. Circuito RL-Diodo.

Para tensiones mayores a  $U_0$ , el diodo está polarizado en directa, con capacidad  $C_2$  y resistencia  $R_2=1/G_2$ , y para menores, está en polarización inversa, con capacidad  $C_1$  y resistencia  $R_1=1/G_1$ , con  $G_1=0$ , o sea  $R_1= \infty$ .

A partir de las leyes de Kirchoff para el circuito equivalente, se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{G_K}{C_K} q - q_0 + i \quad (1)$$

$$\frac{di}{dt} = -\frac{1}{LC_K} q - \frac{R}{L} i + \frac{E \cos \omega t - U_0}{L} \quad (2)$$

donde el subíndice K es 1 o 2 dependiendo de la región de voltaje.

Definiendo el vector  $x(t)$  como la matriz fila:

$$x(t) = [q(t) - q_0, i(t)] \quad (3)$$

Resulta que el sistema formado por las ecuaciones (2) y (3) se puede escribir de la forma:

$$\frac{dx}{dt}(t) = -A_K \cdot x(t) + b_K(t) \quad (4)$$

Con la matriz  $A_K$  definida por la expresión:

$$A_K = \begin{pmatrix} -\frac{G_K}{C_K} & 1 \\ -\frac{1}{C_K L} & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Y el vector  $b_K$ , dado por la fila:

$$b_K(t) = \left[ 0, \frac{E \cos(\omega t) - V_0}{L} \right]^T \quad (6)$$

La solución del sistema (4) tiene la forma general:

$$x(t) = x_{sK}(t) + e^{A_K(t-t_0)} [x(t_0) - x_{sK}(t)] \quad (7)$$

Con

$$x_{sK}(t) = C_K \cos(\omega t) + d_K \sin(\omega t) + e_K \quad (8)$$

Para calcular la relación de Feigenbaum, en un circuito caótico, se utiliza la ecuación:

$$\delta \equiv \frac{P_{n+1} - P_n}{P_{n+2} - P_{n+1}} \quad (9)$$

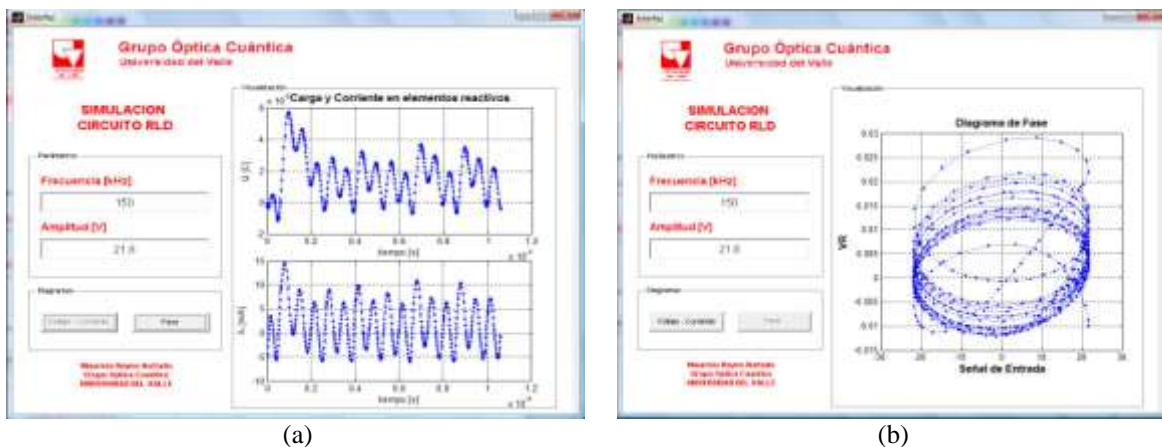
donde  $P_n$  es el valor del parámetro  $P$  medido a la  $n$ -ésima bifurcación.

## 2.1. Modulación de la Corriente de Inyección

Los valores medidos de los elementos del circuito, R y L, fueron:  $R = (220 \pm 0,05) \Omega$ ;  $L = (2 \pm 0.01) \text{ mH}$ ; y se utilizó un diodo 1N4007. Como señal de salida del circuito se tomó la caída de tensión sobre la Resistencia. El sistema fue alimentado utilizando un generador de señal. Se midió la tensión de salida sobre la resistencia y la tensión de entrada en la fuente, utilizando un osciloscopio Tektronix TDS 200. Se hicieron variaciones de la frecuencia de la señal de entrada, manteniendo una amplitud constante, con el fin de observar desdoblamientos del período. Se observó en el osciloscopio las gráficas de voltaje sobre la resistencia Vs. voltaje de la señal de entrada y se obtuvieron datos correspondientes a los diagramas de fase como consecuencia al desdoblamiento del período (fue posible distinguir hasta 6 períodos).

## 2.2. Simulación del Circuito Caótico RL-Diodo

Para simular el circuito RL-Diodo, se usaron (1) – (2) para formular un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden, y como un problema de valor inicial. Posteriormente, este sistema de ecuaciones de variables de estado se programó en MatLab, cuya solución se obtiene por la aplicación del método de integración numérica. Al ejecutar el procedimiento de simulación propuesto con los valores predeterminados de los elementos, se obtienen las gráficas.



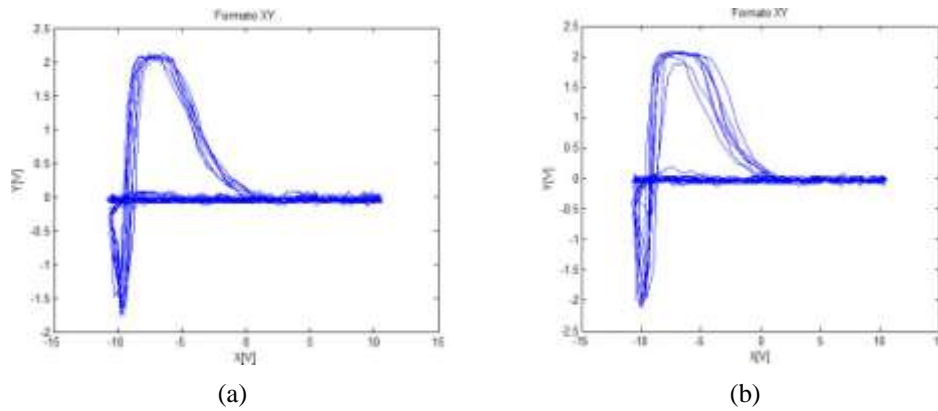
**Figura 2.** a) Interface: carga y corriente del comportamiento del circuito RL-Diodo para una frecuencia de 150Khz,  
b) Interface: Diagrama de fase del circuito RL-Diodo para una frecuencia de 150Khz.

El cálculo de las trayectorias de estado usando el sistema propuesto en MatLab emplea como variables la frecuencia y la amplitud de la señal, utilizando los valores de los elementos del circuito RL-Diodo, donde:  $L=2\text{mH}$ ,  $R=220\Omega$ ,

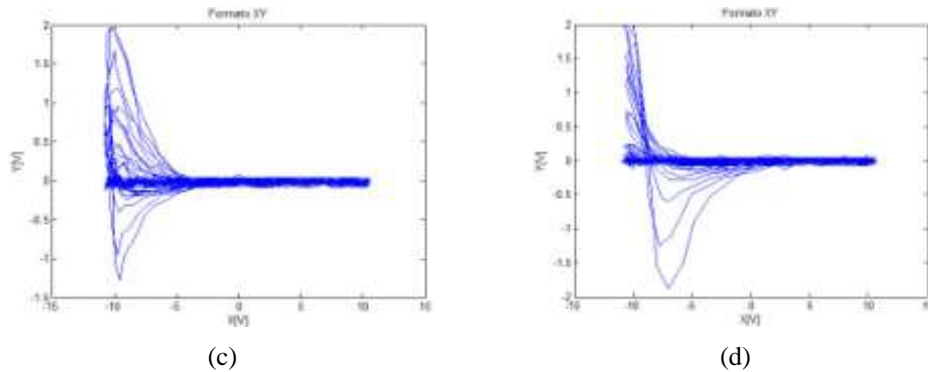
$E=21.8V$ . El programa de simulación propuesto puede ser muy útil para ayudar a determinar de manera interactiva los valores de los elementos del circuito RL Diodo antes de realizar su implementación física.

### 3. INDUCCIÓN DE CAOS EN EL DIODO LÁSER

Se bombeó eléctricamente el diodo láser con la señal caótica obtenida de la etapa de acondicionamiento y se observó el comportamiento dinámico cuando se modula la corriente de inyección, encontrando rupturas del régimen periódico a un régimen de bifurcaciones por doblamiento de periodo, permitiendo obtener la conocida ruta al caos mediante bifurcaciones. Se midió la señal luminosa del diodo láser sobre un fotodiodo rápido. La señal eléctrica fue medida con un osciloscopio. Este sistema describe la evolución que presenta un diodo láser a medida que se varían las condiciones iniciales (en este caso frecuencia) mediante un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales que da a conocer la dinámica del dispositivo, los diodos láser presentan oscilaciones de relajación. El comportamiento no lineal del diodo láser presenta una gran importancia de regímenes de comportamiento.

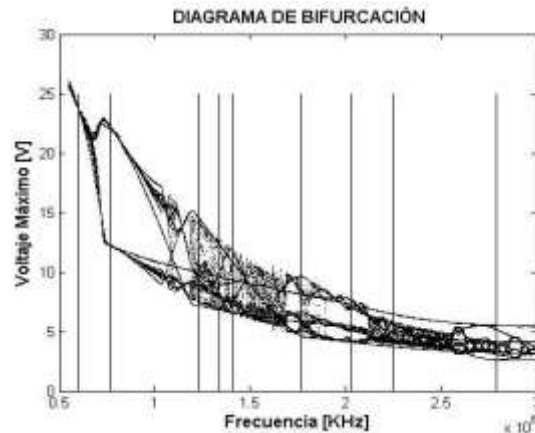


**Figura 3.** Comportamiento no lineal del diodo láser, diagramas de fase: Frecuencia de la señal 125.5KHz, b) 127.9KHz.



**Figura 4.** Comportamiento no lineal del diodo láser, diagramas de fase: Frecuencia de la señal 175.7KHz, d) 206.7KHz.

Los resultados que se obtienen para un comportamiento periódico del sistema, se presentan cuando el bombeo de corriente en el diodo láser genera pulsos de luz con una determinada frecuencia. Este sistema dinámico incluye parámetros que mantienen valores fijos. Los resultados demuestran que la dinámica caótica es alcanzada en un circuito RL-Diodo, encontrando resultados básicos que dan a lugar a comportamientos caóticos, mostrando que el régimen caótico del circuito RL-Diodo tiene fuerte dependencia a la variación de la frecuencia. Se observó una progresión de la dinámica que se inició con regímenes de comportamiento oscilatorio que no son caóticos, a través de bifurcaciones en la oscilación, y finalizó en oscilaciones caóticas.



**Figura 5.** Diagrama de Bifurcación comparado con las frecuencias experimentales.

Con la simulación numérica del circuito caótico RL-Diodo, se comparó con las frecuencias experimentales en las que el circuito presenta bifurcaciones, el modelo es cualitativamente muy bueno, ya que se ven desdoblamientos de períodos y curvas similares a las experimentales, como se muestra en la gráfica 5.

### CONCLUSIONES

Se observó caos en un rango diverso de frecuencia, manteniéndose siempre en el orden de los Khz. El fenómeno de bifurcación se observó para 2, 4 y 8 períodos. Se acopló este sistema electrónico no lineal a un diodo láser y se logró inducir efectos del caos por medio de la inyección de corriente.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad del valle y al departamento de física por el apoyo a este proyecto.

### REFERENCIAS

1. M Richard A. Holmgren, "A First Course in Discrete Dynamical System" second edition – Springer Verlag.
2. M A. Azzouz, M. Hasler, "Orbits of the R-L-Diode Circuit". On Circuits and Sys. Vol 37, pp. 1330-1339, Nov. 1990.
3. K. Murali, M. Lakshmanan, L. O. Chua, "The Simplest Dissipative Nonautonomous Chaotic Circuit". IEEE Trans. On Circuits and Sys. Vol 41, n° 6, Jun. 1994, pp. 462-463.
4. T. Matsumoto, L. Chua, S. Tanaka, "Simplest Chaotic Nonautonomous Circuit". Phys. Rev. A, Vol. 30, pp. 1155-1157, Aug. 1984.
5. R. W. Rollins, E.R Hunt, "Exactly Solvable Model of a Physical System Exhibiting Universal Chaotic Behavior". Phys. Rev. Letters, Vol. 49, n° 18, pp. 1295- 1298, Nov. 1982.
6. A. Azzouz, M. Hasler, IEEE. 37 (11), (1990).
7. B. Prusha, The College of Wooster, Measuring Feigenbaum's  $\delta$  in a bifurcation electric circuit.
8. R. Lua, University of Minnesota, Period doubling in a simple diode circuit, (2002).