

COMPLEJIDAD E INTERDISCIPLINARIEDAD. ESTUDIO DE CASO: SINCRONIZACIÓN DE OSCILADORES ELECTRÓNICOS BIOINSPIRADOS

Gonzalo Marcelo Ramírez Ávila

Carrera de Física, Facultad de Ciencias Puras y Naturales, Universidad Mayor de San Andrés, Casilla 8635. La Paz, Bolivia

Resumen

En el presente artículo, se explica de manera sencilla lo que constituye la Complejidad y sus manifestaciones en diferentes situaciones. Se mencionan sucintamente las herramientas que se utilizan para el análisis de Sistemas Complejos. Finalmente, se da la explicación de un estudio de caso que pone en evidencia el potencial carácter interdisciplinario de la ciencia de la Complejidad y que además muestra la producción científica e intelectual que se realiza en la UMSA.

1. Introducción

La visión de un mundo “armónico y ordenado” evocado por ciertas corrientes filosóficas y por muchas de las religiones ha sido desde mucho tiempo atrás cuestionada por pensadores y científicos que basados en sus observaciones de la naturaleza veían que si bien existen estructuras ordenadas, también hay muchos procesos que no parecen seguir ningún orden subyacente. Desde luego, para no caer en especulaciones y dogmas, los científicos siempre han tratado de llegar a la esencia de los fenómenos que estudian y en esos intentos pretenden responder a la pregunta del *¿por qué?* ocurre tal o cual fenómeno. No siempre se tiene la gloria de poder dar la respuesta adecuada, pero en cada uno de esos intentos se procede de manera racional y utilizando lo que se denomina el *método científico*.

La Física ha experimentado una gran revolución a comienzos del siglo XX con el establecimiento de la Teoría Especial de la Relatividad y de la Mecánica Cuántica; la primera de ellas establece una unificación entre la Mecánica Clásica con la Electrodinámica Maxwelliana, en tanto que la segunda posibilita la descripción de los objetos microscópicos de la naturaleza, tales como los átomos.

De esa misma época, se deben destacar los trabajos del físico austriaco Ludwig Boltzmann quien introduce el concepto de entropía como un indicador del desorden de un sistema; los de Albert Einstein acerca del movimiento Browniano, que luego se constituiría en la base de la Mecánica Estadística del No Equilibrio y de la Teoría de Procesos Estocásticos; y los de un gran científico francés llamado Henri Poincaré, quien da las bases de lo que hoy se conoce como la Teoría del Caos, al estudiar el *problema de los tres cuerpos*.

En el transcurso del siglo XX, la Dinámica No Lineal comenzó a ser estudiada por diferentes escuelas científicas tanto en Europa occidental como oriental y en los Estados Unidos. En los años 60 del siglo pasado, Edward Lorenz propone un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales, base de un modelo meteorológico, que hoy en día constituye un modelo paradigmático del caos. El concepto de caos asociado al de atractor extraño encuentra eco en otros modelos, tales como el de Rössler (basado en reacciones químicas) y el de Chua (basado en circuitos electrónicos). Estos atractores extraños que caracterizan al caos están mostrados en la Fig. 1. Hoy en día, la Dinámica No Lineal ha experimentado un notable avance y ha trascendido a una gran variedad de disciplinas a través de lo que se conoce como la ciencia de la Complejidad.

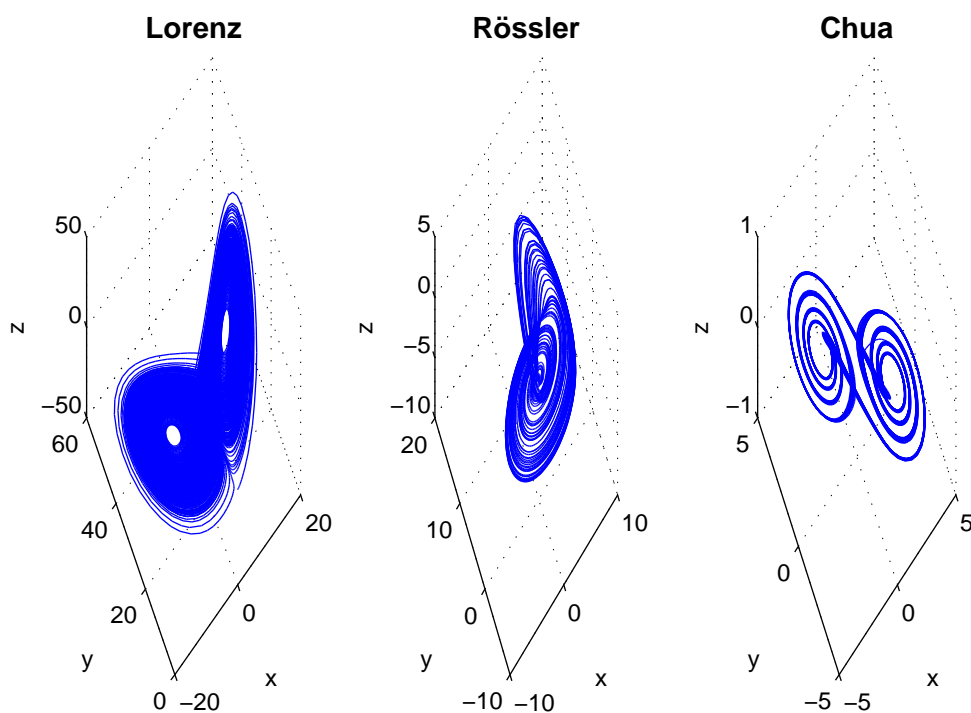


Fig. 1: Atractores extraños para valores de parámetros que dan lugar a caos en los sistemas de Lorenz, Rössler y Chua.

2. El Lenguaje de la Complejidad

En ocasiones, el lenguaje de la ciencia no coincide con el lenguaje cotidiano; un ejemplo de ello es el concepto de trabajo en Física que en general no tiene mucho en común con el concepto cotidiano de la misma palabra. Cuando nos referimos a la palabra Complejo en ciencia, tampoco es coincidente con el lenguaje de la vida cotidiana. Así, mientras que para el común de la gente, *complejo* tiene la connotación de complicado, en ciencia, mas bien tiene el significado de un fenómeno emergente de la interacción de los elementos que constituyen un determinado sistema.

No existe una definición absoluta de lo que es un Sistema Complejo; algunos autores lo definen como un conjunto de un gran número de constituyentes en interacción, aunque existen sistemas complejos que no necesariamente tienen muchos componentes, ejemplos de ello, constituyen el problema de los tres cuerpos, sistemas pequeños de osciladores acoplados. Un aspecto importante de los Sistemas Complejos es el comportamiento global que resulta de la totalidad de las interacciones de sus constituyentes más elementales (ya sea que los sistemas tengan pocos o muchos constituyentes). La complejidad surge de la constatación que en diversos dominios científicos, aparecen sistemas complejos muy diferentes que pueden ser estudiados por métodos similares, de ahí el carácter interdisciplinario de la ciencia de la Complejidad. El comportamiento de un sistema complejo, en general, no es previsible por los métodos analíticos clásicos y mas bien se utiliza la trilogía: Modelización–Simulación–Optimización. No se debe olvidar que la simulación representa sólo una caricatura de la realidad física y el trabajo de los que se valen de la simulación es hacer esta caricatura lo más fiel posible a la realidad.

Algunas características esenciales de los Sistemas Complejos son:

- Presentan una cierta organización y esta no es ni estrictamente definida ni estrictamente aleatoria.
- Implican la existencia de información que puede ser modulada por señales externas.
- En general se encuentran fuera del equilibrio termodinámico y son sistemas abiertos.
- Presentan estados estacionarios múltiples.
- Tienen una “historia”, es decir, dependen de sus estados anteriores.
- Presentan efectos no lineales que se traducen en fenómenos de emergencia de nuevas propiedades.
- Son adaptativos.

En los últimos años se ha desarrollado una vasta terminología ligada a la Complejidad, por citar algunos de estos términos: Dinámica No Lineal, Auto-organización,

Formación de patrones, Sincronización, Fractales, Teoría de catástrofes, Percolación, Autómatas celulares, Redes complejas, Transiciones de fase, Bifurcación, Caos. Todos ellos sustentados en numerosas investigaciones. El estudio de caso que se considerará en este artículo está en relación con un fenómeno no lineal que está ligado con el surgimiento de orden: la sincronización.

3. Sincronización en Osciladores Electrónicos Bioinspirados

En la naturaleza, existen muchos sistemas que sincronizan, las luciérnagas tienen este comportamiento síncrono con el fin de poder comunicarse e identificar a sus conespecíficos. Este comportamiento tiene como objetivo principal el de reproducirse una vez que los individuos de la misma especie pudieron identificarse. Basados en este fenómeno biológico, se emuló este comportamiento utilizando circuitos electrónicos oscilantes que son capaces de detectar y emitir señales luminosas. A estos circuitos bioinspirados se los denominó osciladores fotocontrolados y para los cuales se utiliza el acrónimo LCO que proviene del inglés Light-Controlled Oscillator.

3.1. Sincronización

La sincronización, que puede ser entendida como el ajuste de ritmos entre dos o más osciladores debido a sus interacciones, es un fenómeno omnipresente tanto en sistemas naturales como artificiales y es un típico ejemplo de auto-organización. Este fenómeno descrito por primera vez por el científico holandés Christian Huygens en 1673, quien observó sincronización en dos péndulos acoplados, permaneció durante más de dos siglos sin ser estudiado seriamente y es sólo en los años 20 del siglo pasado en que los trabajos de Eccles, Vincent, Appleton y van der Pol, que observaron sincronización en generadores eléctricos, impulsaron a los científicos de la época a estudiar este fenómeno con mayor profundidad; principalmente por los que luego constituyeron la “escuela soviética”, entre los que destacan Blekhman, Arnol'd, Shilnikov, Afraimovich, Pikovsky, etc. quienes estudiaron tanto experimental como teóricamente la sincronización en diversos sistemas. El estudio de este fenómeno cobra popularidad hace aproximadamente 20 años, tiempo en el cual se produjeron diversidad de artículos y libros que tratan de una u otra manera sobre la sincronización en sistemas que van desde los biológicos (luciérnagas, grillos, cigarras, hormigas, sistemas ecológicos, diferentes comportamientos en poblaciones humanas, células cardíacas, neuronas, etc.) pasando por sistemas químicos (por ej. reacciones de Belousov-Zhabotinsky, osciladores bioquímicos) y llegando a sistemas artificiales como láseres, circuitos electrónicos, etc.

3.2. Luciérnagas

Numerosos estudios fueron realizados para poder explicar el comportamiento síncrono de las emisiones de luz de varias especies de luciérnagas. Se tienen reportes de varios experimentos neuronales que sugieren que la emisión rítmica

de luz es controlada por un mecanismo neurológico que oscila a una frecuencia regular. Cada emisión luminosa se desencadena por impulsos nerviosos en el cerebro que se propagan para dar lugar a esta emisión. una hipótesis para explicar la sincronización de las luciérnagas está basada en el hecho de que el comportamiento rítmico individual que puede cambiar su fase por efecto de la recepción de emisiones luminosas de otros individuos puede dar lugar a la sincronización. Algunos autores han estudiado desde un punto de vista matemático la sincronización de algunas especies de luciérnagas, tal es el caso de *Photinus pyralis*; sin embargo, en estos análisis se consideran simplificaciones muy grandes para hacerlos matemáticamente tratables, en desmedro de la realidad física.

3.3. Osciladores Electrónicos Fotocontrolados

Como fue descrito en [1, 2, 3], un LCO es un oscilador electrónico de relajación en el sentido de que este posee dos escalas de tiempo, las cuales están asociadas a ciclos en los que se tienen variaciones de voltaje lentas (etapa de carga) y variaciones de voltaje rápidas (etapa de descarga y en la cual el LCO emite un pulso luminoso). Cada LCO consiste de un chip LM555 conectado para funcionar en su modo oscilatorio astable. El inicio de las etapas de carga y descarga están determinados por dos umbrales bien definidos y situados a $V_M/3$ y $2V_M/3$ respectivamente; siendo V_M el voltaje de la fuente. El período de un LCO está relacionado con los valores de las resistencias (R_λ, R_γ) y del condensador (C) y está dado por $T = T_\lambda + T_\gamma$, donde $T_\lambda = (R_\lambda + R_\gamma)C \ln 2 = \ln 2/\lambda$ es el intervalo de tiempo en el cual toma lugar la carga y $T_\gamma = R_\gamma C \ln 2 = \ln 2/\gamma$ el correspondiente a la etapa de descarga. Un LCO está caracterizado por el voltaje de salida $V(t)$ tomado en la pata 3 del chip LM555. Los LCOs pueden interactuar entre ellos por medio de pulsos luminosos, por lo que están equipados con fotosensores y LEDs que posibilitan el acoplamiento óptico. Los fotosensores actúan como fuentes de corriente cuando están recibiendo luz, haciendo que el tiempo de carga del condensador se acorte y/o haciendo que el tiempo de descarga del mismo se alargue (una descripción detallada del circuito y su funcionamiento se da en [1, 2]).

Las ecuaciones que describen el modelo para N LCOs son:

$$\frac{dV_i(t)}{dt} = \lambda_i[(V_{Mi} - V_i(t))\epsilon_i(t) - \gamma_i V_i(t)[1 - \epsilon_i(t)] + \sum_{i,j}^N \beta_{ij} \delta_{ij} [1 - \epsilon_j(t)], \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (1)$$

donde β_{ij} es la intensidad de acoplamiento, $\delta_{ij} = 1$ si los LCOs pueden interactuar y $\delta_{ij} = 0$ en otro caso, y $\epsilon_i(t)$ es el estado del oscilador que toma el valor 1 (etapa de carga) ó 0 (etapa de descarga); $\epsilon_i(t)$ cambia su valor cuando se alcanza el umbral superior ($2V_M/3$) o el umbral inferior ($V_M/3$). Se debe mencionar que el modelo ha sido validado experimentalmente [3].

Utilizando observaciones experimentales y numéricas, se mostró en [3] una fuerte dependencia a las condiciones iniciales incluso para sistemas compuestos sólo por 2 LCOs.

4. Conclusiones y Perspectivas

Es evidente que la ciencia de los Sistemas Complejos tiene un carácter interdisciplinario que es demostrado con nuestro estudio de caso, en el cual, están involucrados conceptos de Biología, Física, Electrónica, Matemática e Informática. Nuestros resultados muestran que no hay un comportamiento exactamente predecible. Esto podría estar relacionado con el hecho de que los LCOs son sensibles a las condiciones iniciales, como se ha demostrado para 2 y 3 LCOs [3]. Por lo que, cuanto mayor sea la población, más difícil es predecir el comportamiento del sistema. Sin embargo, las simulaciones permiten identificar regiones en las cuales es más probable de observar sincronización total. Además de los aspectos citados en este artículo, se realizaron investigaciones que conciernen temas tales como la determinación de regiones de sincronización (más conocidas como lenguas de Arnol'd) [4]; la determinación de curvas de respuesta de fase de los LCOs (que permiten cuantificar la influencia de estímulos externos sobre los osciladores) [3]; la determinación de comportamientos estables e inestables en un sistema de dos LCOs idénticos [5]; la sincronización en cadenas de LCOs [6] y la determinación de transientes en la sincronización de LCOs localmente acoplados [8, 9]; y el estudio de la influencia de ruido sobre un sistema de dos LCOs [7, 11]. Por otra parte, están en curso investigaciones relacionadas con la “muerte” de oscilaciones y la formación de cúmulos síncronos bajo diferentes configuraciones de acoplamiento. Este tipo de osciladores podría ser aplicado a otros sistemas, tales como neuronas.

Es interesante observar que diferentes grupos de investigación en la UMSA están empleando las herramientas de la Complejidad para analizar sus sistemas bajo investigación. Sin embargo, aún no se han podido concretar trabajos verdaderamente interdisciplinarios a nivel de las unidades de investigación de la UMSA. Existen buenas intenciones para ello, provenientes del Grupo de Sistemas Complejos de la Carrera de Física, de algunos investigadores del Instituto de Hidráulica, de las Carreras de Química, Biología, Matemática y Psicología. Este creciente entusiasmo por los Sistemas Complejos es bastante positivo aunque se debe ser cauto para no utilizar abusiva e indiscriminadamente la terminología de los Sistemas Complejos [10].

Agradecimientos

Se agradece al Instituto de Investigaciones Físicas que pese a todas las limitaciones, principalmente económicas, permite que los investigadores que formamos parte de él podamos realizar nuestra actividad científica. A la Sociedad Boliviana de Física que mediante la publicación de la Revista Boliviana de Física, nos motiva a dar a conocer el fruto de nuestras investigaciones mediante artículos que son sometidos a árbitros internacionales. Finalmente, a mis colaboradores, en particular al Prof. Jean-Louis Deneubourg de la Universidad de Bruselas quien por varios años me ha acogido en su grupo de investigación y con quien siempre he tenido discusiones que iluminaron mi mente.

Referencias

- [1] J. L. Guisset, G. M. Ramírez Ávila, & J. L. Deneubourg, “Construcción de osciladores controlados por luz y medida de su comportamiento síncrono,” *Revista Boliviana de Física*, no. 7, pp. 102–114, 2001.
- [2] J.-L. Guisset, J.-L. Deneubourg, & G. M. Ramírez Ávila, “The phase information associated to synchronized electronic fireflies,” *arXiv.nlin.AO/0206036*, no. Mon, 24 Jun 2002 16:07:15 GMT, 2002.
- [3] G. M. Ramírez Ávila, J. L. Guisset, & J. L. Deneubourg, “Synchronization in light-controlled oscillators,” *Physica D*, vol. 182, no. 3-4, pp. 254–273, 2003.
- [4] G. M. Ramírez Ávila, J. L. Guisset, & J. L. Deneubourg, “Synchronous behavior in small populations of light-controlled oscillators,” in *11th International IEEE Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems* (R. Stoop, ed.), (Scuol/Schuls, Switzerland), pp. 201–204, 2003.
- [5] G. M. Ramírez Ávila, J. L. Guisset, & J. L. Deneubourg, “Estudio de la sincronización en un sistema de dos osciladores idénticos controlados por luz,” *Revista Boliviana de Física*, no. 10, pp. 1–7, 2004.
- [6] G. M. Ramírez Ávila, J. L. Guisset, & J. L. Deneubourg, “Synchronization in chains of light-controlled oscillators,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 23, pp. 252–258, 2005.
- [7] G. M. Ramírez Ávila, J. L. Guisset, & J. L. Deneubourg, “Influencia del ruido en la sincronización de dos osciladores fotocontrolados,” *Revista Boliviana de Física*, no. 11, pp. 44–51, 2005.
- [8] G. M. Ramírez Ávila, J. L. Guisset, & J. L. Deneubourg, “Sincronización en osciladores fotocontrolados localmente acoplados,” *Revista Boliviana de Educación Superior en Ciencias*, no. 5, pp. 164–170, 2006.
- [9] G. M. Ramírez Ávila, J. L. Guisset, & J. L. Deneubourg, “Sincronización y transientes en configuraciones unidimensionales de osciladores fotocontrolados localmente acoplados,” *Revista Boliviana de Física*, no. 12, pp. 1–7, 2006.
- [10] G. M. Ramírez Ávila, “Complejo y complicado: especialización e interdisciplinariedad,” *Revista Boliviana de Educación Superior en Ciencias*, no. 6, pp. 21–29, 2006.
- [11] G. M. Ramírez Ávila, J. L. Guisset, & J. L. Deneubourg, “Influence of uniform noise on two light-controlled oscillators,” *Aceptado para su publicación en diciembre de 2007 en International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2007.