

COMPLEJO Y COMPLICADO: ESPECIALIZACIÓN E INTERDISCIPLINARIEDAD

Dr. G. Marcelo Ramírez Ávila
Instituto de Investigaciones Físicas
Universidad Mayor de San Andrés
Casilla 8635
La Paz – Bolivia

Email: mravila@fiumsa.edu.bo

Website: <http://www.fiumsa.edu.bo/docentes/mramirez/>

RESUMEN

Se dan los conceptos esenciales acerca de la ciencia de la Complejidad, así como las herramientas y el lenguaje que se utiliza en la misma. Se hace una revisión a algunos artículos relacionados con el tema. Finalmente, se muestra un estudio de caso que consiste en el análisis de un sistema de circuitos electrónicos bioinspirados que se toma como ejemplo de sistema complejo.

Palabras claves: complejidad; sistemas dinámicos; dinámica no lineal; sincronización; caos.

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 Maxweliana, 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 (Lorenz 1963). El concepto de caos asociado al de atractor

extraño encuentra eco en otros modelos, tales como el de Rössler (basado en reacciones químicas) (Rössler 1976) y el de Chua (basado en circuitos electrónicos) (Chua, Yao et al. 1986). 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.

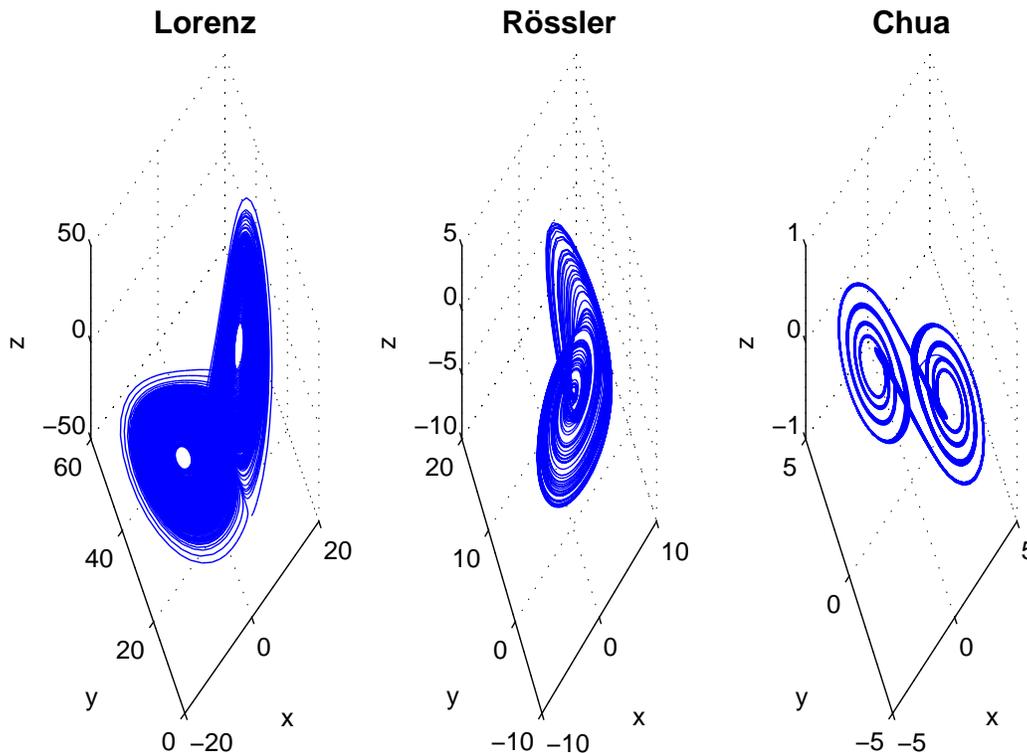


Figura 1. Atractores extraños para valores de parámetros que dan lugar a caos en los sistemas de Lorenz, Rössler y Chua.

2. COMPLEJO Y COMPLICADO

A menudo sucede que el significado de algunos términos científicos, no coincide con el que se tiene para el lenguaje común. Un ejemplo típico de ello es el significado de trabajo en la vida cotidiana que está relacionado con una actividad ya sea física o mental que conduce a la ejecución de una determinada obra. Sin embargo, desde el punto de vista físico,

el concepto de trabajo implica la existencia de una fuerza que actúa sobre un sistema que provoca un desplazamiento del mismo; así, se toma como sistema a un bus de transporte urbano que hace un recorrido de ida y vuelta, volviendo exactamente al mismo lugar del que partió, el trabajo sobre este bus es nulo puesto que al final del proceso no hubo un desplazamiento neto. Una situación análoga ocurre

cuando se habla de términos tales como *caos*, *complejo* y *complicado*. En muchos diccionarios se encuentra incluso que complejo es sinónimo de complicado. A continuación se considerará una clasificación de *sistemas dinámicos* basada en el número de grados de libertad¹ y en el grado de linealidad o no linealidad de los mismos. El número de grados de libertad está ligado al número de constituyentes del sistema y un sistema tenderá a ser complicado a medida que este número crece. Sin embargo, el hecho de que un sistema sea complicado no necesariamente significa que el mismo será complejo. En la Fig. 2 se muestra un gráfico en el que se toman el número de grados de libertad y el grado de linealidad para definir si un sistema es complejo y/o complicado. En este gráfico, y solamente con fines ilustrativos, se identifican regiones en las cuales se mencionan algunos sistemas dinámicos y su posición aproximada en el gráfico propuesto para mostrar las diferencias entre un sistema complejo y un sistema complicado. Evidentemente, para la determinación de si un sistema es complejo o complicado, se debe primeramente especificar qué es lo que se observa del sistema, si son las propiedades microscópicas o macroscópicas; así por ejemplo, si analizamos a una hormiga como individuo aislado, el comportamiento de la misma no presenta características complejas en su comportamiento y considerándola solamente de manera macroscópica, tampoco ofrece complejidad alguna. Sin embargo, si se consideran los aspectos microscópicos

¹ Formalmente hablando, el número de grados de libertad de un sistema, es el número de variables que son necesarias y suficientes para describir completamente un sistema mecánico; asimismo, se puede indicar que el número de grados de libertad es el número de coordenadas independientes que se requieren para especificar completamente la posición de todas y cada una de las partículas componentes del sistema.

que están en relación con el funcionamiento de los diferentes órganos de la hormiga, ahí si se puede hablar de complejidad y de fenómenos emergentes a ese nivel que se traducen en que la hormiga pueda desarrollar una u otra actividad. Ahora, si se considera una colonia de hormigas desde una visión macroscópica, el comportamiento de los individuos que forman parte de esta colonia puede dar lugar a fenómenos emergentes tales como la construcción de un nido, el desplazamiento de una presa, etc. En este sentido, el fenómeno de auto-organización emergente depende de las interacciones entre los individuos de la colonia y si afinamos un poco los conceptos, dependerá también de estímulos que pueden provenir de acciones ya realizadas por otros congéneres, fenómeno que se denomina estigmergia (Camazine, Deneubourg et al. 2001). Este tipo de fenómenos emergentes en insectos sociales, puede extrapolarse a comportamientos de otros animales sociales, entre ellos el hombre. Así, los comportamientos colectivos representan ejemplos claros de sistemas complejos. Como se puede percibir de los ejemplos citados anteriormente, depende cómo se analice un sistema para determinar si en la faceta analizada, el sistema representa o no un sistema complejo.

En lo referente a sistemas complicados, se puede decir que son sistemas compuestos de muchos constituyentes, pero la gran diferencia con los sistemas complejos es que los sistemas complicados no dan lugar a fenómenos emergentes y a pesar de que en muchos casos es muy difícil comprender el funcionamiento de un sistema complicado, un especialista puede lograrlo. Así, un *especialista* en mecánica automotriz conoce muy bien el funcionamiento de un automóvil y la utilidad de cada una de las piezas que lo componen. Situaciones similares se pueden encontrar cuando hablamos de

un televisor, una planta hidroeléctrica o un reactor nuclear; siempre van a haber especialistas que conozcan los detalles

de funcionamiento de estos sistemas complicados.

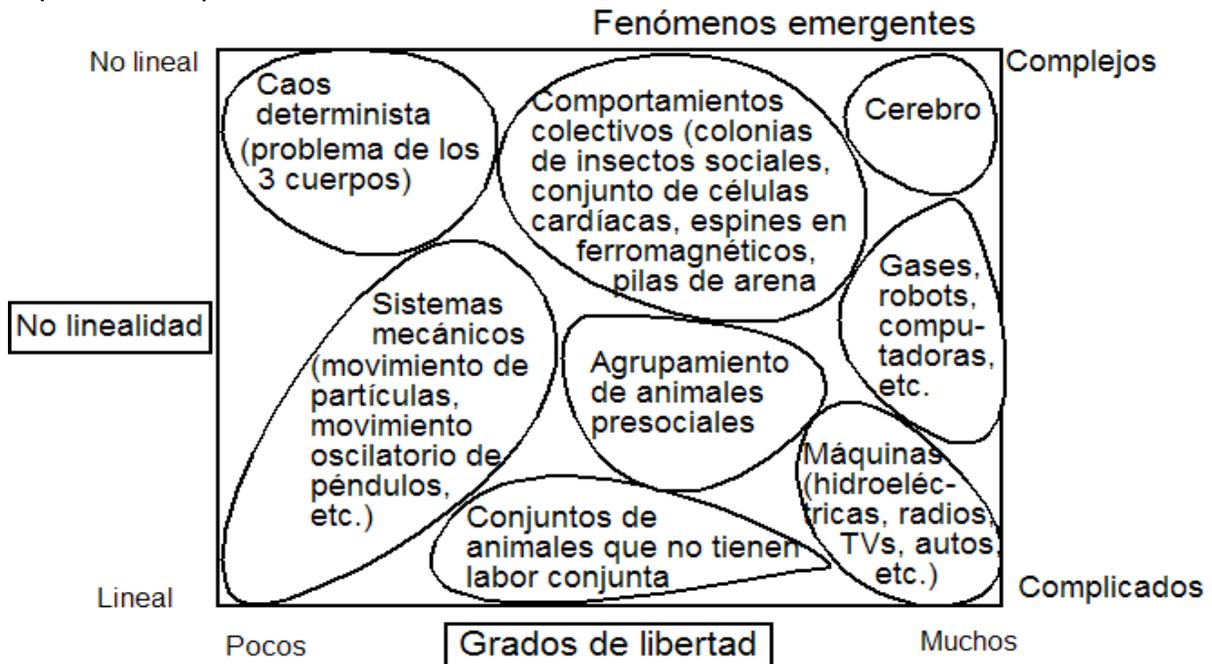


Figura 2. Diagrama No Linealidad versus Grados de Libertad de un sistema para poder identificarlo como complejo o complicado.

Se debe señalar que las máquinas no solo son complicadas, en situaciones podemos ver fenómenos emergentes relacionados con ellas. Nuevamente, es muy importante definir qué aspectos del sistema se quieren considerar para poder clasificarlo como sistema complejo o complicado. Consideremos por ejemplo un robot con mecanismos móviles que permiten que el robot pueda levantar y sostener una barra de un material cualquiera. Desde un punto de vista de las componentes del robot, éste está constituido por muchos componentes electro-mecánicos que hacen que lo podamos clasificar simplemente como un sistema complicado², es decir, un sistema que a pesar de que pueda parecer de difícil descripción para los no versados en robótica, para un especialista en esta área, esta descripción será siempre posible. Por

otro lado, si sólo consideramos al robot en el sentido de las acciones que pueda efectuar (levantar, sostener y eventualmente depositar una barra), el robot podría ser catalogado como un sistema simple. Sorprendentemente, la interacción entre robots puede dar lugar a un fenómeno emergente en el cual todas las barras depositadas por los robots se concentran espacialmente (Beckers, Holland et al. 1994). Aún más sorprendente es el hecho de que pueda ser posible la interacción entre robots e insectos de cierto género gracias a que los robots están programados para imitar ciertos comportamientos de los insectos e cuestión (De Schutter, Theraulaz et al. 2001). Un último acápite acerca de comportamientos que puedan ser considerados como complejos o complicados es el considerar ciertos aspectos en la producción intelectual de un ser humano; un músico que ejecuta una composición de un compositor, en cierta manera está dando lugar a una

² Nótese la aparente contradicción en el empleo de las palabras simplemente y complicado.

acción complicada (dependiendo el tipo de música), pero no compleja puesto que está repitiendo un conjunto de notas creadas por otro músico; en cambio, un compositor da lugar a obras originales, en cuyo caso, la acción es compleja puesto que da lugar a un fenómeno emergente que es la creación de una nueva obra musical. Lo mismo podríamos decir acerca de la literatura, la ciencia, etc. En otras palabras, el plagio y la copia podrían ser acciones eventualmente complicadas, en tanto que la creatividad y originalidad en un trabajo son acciones complejas.

3. COMPLEJIDAD

No existe una definición absoluta de lo que es un *sistema complejo*; y no se tienen criterios uniformes entre los investigadores para dar esta definición. Así, algunos autores lo definen como un conjunto de un gran número de constituyentes en interacción que como vimos en la sección anterior, no es una definición muy afortunada puesto que pueden haber sistemas complejos con pocos constituyentes. Un aspecto importante de los *sistemas complejos* es el comportamiento global que resulta de la totalidad de las interacciones de sus constituyentes elementales (ya sea que los sistemas tengan pocos o muchos de estos); este comportamiento global *emergente* es la característica principal de un *sistema complejo*. Este tipo de fenómenos emergentes aparecen en un gran número de sistemas, a pesar de que estos sistemas sean de naturaleza muy diferente y por eso sean estudiados por diversas ciencias. El hecho de que un sistema presente fenómenos emergentes, ya sea que el sistema sea físico, biológico o social, por mencionar algunos casos, hace que estos sistemas puedan ser analizados por métodos similares, sin importar la naturaleza específica de cada uno de ellos.

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 emergentes 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.

4. PERTINENCIA EN EL “ANÁLISIS” DE SISTEMAS COMPLEJOS

Como toda ciencia que de alguna manera adquiere importancia, la ciencia de la Complejidad y el Caos ofrece muchas vetas para investigadores pero también para gente que empieza a especular con las potenciales aplicaciones de la Complejidad y el Caos. Esto no es sorprendente puesto que históricamente hablando, siempre existieron pensadores que sin la menor precaución utilizaban postulados y resultados de la Relatividad Especial y General, así como de la Mecánica Cuántica para justificar hipótesis filosóficas de una gran variedad incluyendo por supuesto, aquellas relacionadas con el idealismo y la teología. Estos abusos de la terminología científica y las extrapolaciones de las ciencias exactas a las ciencias sociales, generaron en muchos científicos el afán de desenmascarar estas actitudes anticientíficas. Un ejemplo notable de esto es la parodia generada por Alan Sokal en 1996 cuando publica en una afamada revista de ciencias sociales un artículo en el que de forma premeditada, Sokal utiliza arbitrariamente términos provenientes de las ciencias exactas y los mezcla con aspectos sociales y filosóficos (Sokal 1996). El fin evidente de Sokal fue el de atacar satíricamente el abuso del lenguaje de las ciencias exactas, y también de una manera general, denunciar el relativismo postmoderno para el cual la objetividad es una simple convención social (Sokal and Bricmont 1997).

En esta misma revista, en el año 2002, se publicaron varios artículos

relacionados con Dinámica No Lineal y Caos; uno de ellos muy bien estructurado en el que de manera formal se dan los conceptos básicos de caos y fenomenología no lineal y se concluye con un circuito electrónico no lineal que dependiendo de uno de los parámetros de control (la resistencia R de un circuito RCL) puede tener un comportamiento caótico en su serie temporal (Orihuela Sequeiros 2002). Los otros dos artículos publicados en esa oportunidad, a pesar de que exponen conceptos de Dinámica No Lineal y Caos en sus primeras secciones, posteriormente en el “análisis” que hacen de los sistemas que tratan: instituciones de educación superior (Alvarado Kirigin 2002) y la facultad de agronomía (Maldonado 2002) y aunque las ideas con las cuales abordan sus estudios de caso puedan ser buenas en principio, lamentablemente caen en cierta especulación al no justificar formalmente, ya sea mediante ecuaciones, modelos matemáticos y/o simulaciones, las aseveraciones que formulan en sus trabajos. Como se mencionó en la sección anterior, aspectos esenciales del análisis de sistemas complejos son la modelización, la simulación y la optimización. Ningún análisis puede basarse sólo en aspectos cualitativos y de ahí la crítica a trabajos .en los que no se tiene en cuenta ningún formalismo matemático.

5. ESTUDIO DE CASO: SINCRONIZACIÓN EN OSCILADORES ELECTRÓNICOS BIOINSPIRADOS

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. La sincronización es otro fenómeno emergente, por lo que su surgimiento ocurre en sistemas complejos. Este fenómeno está de manera omnipresente en la naturaleza y sistemas de diversa índole dan lugar a sincronización. Entre

los ejemplos típicos de sistemas que sincronizan, se pueden citar a dos o más péndulos acoplados (Bennett, Schatz et al. 2002), la sincronización en las salas de espectáculo cuando el público aplaude (Neda, Ravasz et al. 2000), la sincronización de los impulsos luminosos de luciérnagas (Buck and Buck 1976).

A continuación, trataré de hacer una revisión sucinta de las investigaciones realizadas con los circuitos electrónicos que fueron inspirados justamente en el comportamiento síncrono de algunas especies de luciérnagas. Todos los detalles se pueden encontrar en la bibliografía que se citará en esta revisión. Como fue descrito en (Guisset, Ramirez Avila et al. 2001), (Guisset, Deneubourg et al. 2002) y (Ramirez Avila, Guisset et al. 2003), un LCO³ es un oscilador electrónico de relajación en el sentido de que éste 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 estable (National Semiconductor Corporation 1982). 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 electrónico y su funcionamiento se da en (Guisset, Ramirez Avila et al. 2001) y (Guisset, Deneubourg et al. 2002).

Las ecuaciones que describen el modelo para N LCOs son:

$$\frac{dV_i(t)}{dt} = \lambda_i (V_{Mi} - V_i(t)) \varepsilon_i(t) - \gamma_i(t) (1 - \varepsilon_i(t)) + \sum_{j \neq i}^N \beta_{ij} \delta_{ij} (1 - \varepsilon_j(t)); \quad i, j = 1, \dots, N,$$

donde β_{ij} es la intensidad de acoplamiento, $\delta_{ij}=1$ si los LCOs pueden interactuar y $\delta_{ij}=0$ en otro caso, y $\varepsilon_i(t)$ es el estado del oscilador que toma el valor 1 (etapa de carga) ó 0 (etapa de descarga); $\varepsilon_i(t)$ 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 (Ramirez Avila, Guisset et al. 2003).

Utilizando observaciones experimentales y numéricas, se mostró en (Ramirez Avila, Guisset et al. 2003) una fuerte dependencia a las condiciones iniciales, incluso para sistemas compuestos sólo por 2 LCOs.

Nuestros resultados muestran además 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 (Ramirez Avila, Guisset et al. 2003). Por lo que, cuanto mayor sea la población, más difícil es predecir el

³ LCO es el acrónimo en inglés de Light-Controlled Oscillator, que en español se lo podría traducir como oscilador fotocontrolado.

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) (Ramirez Avila, Guisset et al. 2003); la determinación de curvas de respuesta de fase de los LCOs (que permiten cuantificar la influencia de estímulos externos sobre los osciladores) (Ramirez Avila, Guisset et al. 2003); la determinación de comportamientos estables e inestables en un sistema de dos LCOs idénticos (Ramirez Avila, Guisset et al. 2004); la sincronización en cadenas de LCOs (Ramirez Avila, Guisset et al. 2005); la determinación de transientes en la sincronización de LCOs localmente acoplados (Ramirez Avila, Guisset et al. 2006); y el estudio de la influencia de ruido sobre un sistema de dos LCOs (Ramirez Avila, Guisset et al. 2005). Por otra parte, están en curso investigaciones relacionadas con la "muerte" de oscilaciones y la formación de cúmulos síncronos bajo diferentes configuraciones de acoplamiento.

6. 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.

De todas las consideraciones hechas al definir sistemas complicados y complejos, se podría pensar a priori que la gente especializada tendería mas bien a trabajar con sistemas complicados; sin embargo, la tendencia actual en el mundo científico es que los investigadores además de ser especialistas en sujetos concretos, también recurran al trabajo

interdisciplinario, es decir, con especialistas de otras ramas científicas y así poder desentrañar los misterios de sistemas de la más variada naturaleza.

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.

REFERENCIAS

- Alvarado Kirigin, J. A. (2002). "El análisis de la educación superior en Bolivia mediante la teoría del caos." Revista Boliviana de Educación Superior en Ciencias 2: 109--118.
- Beckers, R., O. E. Holland, et al. (1994). From local actions to global tasks: stigmergy and collective robotics. ALIFE IV, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, MA.
- Bennett, M., M. F. Schatz, et al. (2002). "Huygens's clocks." Proceedings: Mathematical, Physical & Engineering Sciences (The Royal Society) 458(2019): 563--579.
- Buck, J. and E. Buck (1976). "Synchronous fireflies." Scientific American 234(5): 74--79, 82--85.
- Camazine, S., J.-L. Deneubourg, et al. (2001). Self-Organization in

- Biological Systems. Princeton, Princeton University Press.
- Chua, L. O., Y. Yao, et al. (1986). "Devil's staircase route to chaos in a nonlinear circuit." International Journal of Circuit Theory and Applications **14**(4): 315--329.
- De Schutter, G., G. Theraulaz, et al. (2001). "Animal-robots collective intelligence." Ann. Math. Art. Intel. **31**: 223--238.
- Guisset, J.-L., J.-L. Deneubourg, et al. (2002). "The Phase Information Associated to Synchronized Electronic Fireflies." arXiv.nlin.AO/0206036(Mon, 24 Jun 2002 16:07:15 GMT).
- Guisset, J. L., G. M. Ramirez Avila, et al. (2001). "Constructing coupled electronic fireflies and measuring their phase-locking behavior (in Spanish)." Revista Boliviana de Fisica **1**(7): 102--114.
- Lorenz, E. N. (1963). "Deterministic nonperiodic flow." Journal of the Atmospheric Sciences **20**: 130--141.
- Maldonado, F. (2002). "Teoría general de sistemas y del caos." Revista Boliviana de Educación Superior en Ciencias **2**: 119--123.
- National Semiconductor Corporation (1982). LM555/LM555C. LINEAR Databook. **9**: 33--38.
- Neda, Z., E. Ravasz, et al. (2000). "The sound of many hands clapping." Nature **403**(6772): 849--850.
- Orihuela Sequeiros, N. I. (2002). "Generador de caos para sistemas dinámicos no lineales continuos." Revista Boliviana de Educación Superior en Ciencias **2**: 79--107.
- Ramirez Avila, G. M., J. L. Guisset, et al. (2003). "Synchronization in light-controlled oscillators." Physica D: Nonlinear Phenomena **182**(3-4): 254-273.
- Ramirez Avila, G. M., J. L. Guisset, et al. (2003). Synchronous behavior in small populations of light-controlled oscillators. 11th International IEEE Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, Scuol/Schuls, Switzerland.
- Ramirez Avila, G. M., J. L. Guisset, et al. (2004). "Study of synchronization phenomena in two identical light-controlled oscillators (in Spanish)." Revista Boliviana de Fisica **10**: 1--7.
- Ramirez Avila, G. M., J. L. Guisset, et al. (2005). "Noise influence on the synchronous behaviour of two light-controlled oscillators." Revista Boliviana de Fisica(11): 44--51.
- Ramirez Avila, G. M., J. L. Guisset, et al. (2005). "Synchronization in chains of light-controlled oscillators." Journal of Physics: Conference Series **23**: 252--258.
- Ramirez Avila, G. M., J. L. Guisset, et al. (2006). "Sincronización y transientes en configuraciones unidimensionales de osciladores fotocontrolados localmente acoplados." Submitted to Revista Boliviana de Fisica (2006).
- Rössler, O. E. (1976). "Equation for continuous chaos." Phys. Lett. **57**(5): 397--398.
- Sokal, A. (1996). "Transgressing the boundaries: Toward a transformative hermeneutics of quantum gravity." Social Text **46/47**: 217--252.
- Sokal, A. and J. Bricmont (1997). Impostures intellectuelles. Paris, Odile Jacob.

