

# **Sistemas Bio-inspirados: Un Marco Teórico para la Ingeniería de Sistemas Complejos**

Nelson Alfonso Gómez Cruz and Carlos Eduardo Maldonado  
Modeling and Simulation Laboratory  
Universidad del Rosario  
Bogotá, Colombia  
*nelson.gomez@urosario.edu.co*  
*carlos.maldonado@urosario.edu.co*

## **INTRODUCCIÓN**

En este artículo buscamos sentar las bases para el marco teórico de la ingeniería de sistemas complejos. Hasta la fecha, un marco semejante ha sido apenas enunciado, y en términos bastante generales (Wolfram, 1986). Sin embargo, hasta ahora no se ha logrado formular un marco semejante que sirva a los ingenieros, a los científicos y a los filósofos para afirmar con seguridad que se tiene ya un marco teórico para la ingeniería bio-inspirada. Al sentar el siguiente marco trazamos claramente los límites que separan a la ingeniería clásica, incluida la ingeniería de procesos inversos, de la ingeniería de sistemas complejos. Nos encontramos en el centro de una revolución científica y teórica, en términos de Th. Kuhn.

Luego de separar, de manera rápida, la ingeniería clásica de la ingeniería bio-inspirada, obtenemos una visión más clara acerca de la computación no-convencional. A fin de plantear, de manera radical, un (nuevo) marco teórico para la ingeniería de sistemas complejos (ISC) procedemos en zig-zag, así: de un lado, sobre una base al mismo tiempo científica e ingenieril, sugerimos un perímetro orgánico para la ISC; de otra parte, sobre la base de la filosofía y las lógicas no-clásicas, alcanzamos nuevas herramientas conceptuales que profundizan las bases científicas e ingenieriles.

Al final, se hace claro el horizonte amplio y la visión acerca del marco de la ingeniería bio-inspirada, a saber: se trata, ulteriormente, de una teoría general de los sistemas complejos. Así, la ISC forma parte de las ciencias de la complejidad.

# 1. IMPORTANCIA DE LA INGENIERÍA, ES DECIR, DE LA INGENIERÍA BIO-INSPIRADA

Cuando T. Kuhn publicó por primera vez la *Estructura de las revoluciones científicas* puso en claro que las revoluciones científicas tienen dos fases: la teoría o los conceptos, y las técnicas o tecnología. De acuerdo con Kuhn, hacia 1962 la relación era de 1 a 4, así: por cada revolución teórica había cuatro revoluciones fundadas en la tecnología. Un informe de la UNESCO del año 2009 afirma que la relación ha aumentado de 1 a 13. Si ello es así, entonces se hace claro que la tecnología se ha convertido en un terreno fundamental tanto para el progreso del conocimiento como para el impacto de este sobre la sociedad y la naturaleza.

La ingeniería se ha convertido en un terreno triunfante, de lejos. La ingeniería es la forma como la ciencia actúa en el mundo. Sin embargo, hoy en día, la ingeniería ya no existe como tal, como un concepto o terreno general. En los últimos años se ha producido una transformación – si no una revolución- al interior de la ingeniería, la cual ya no solamente transforma a la propia ingeniería, sino, tiene también un impacto serio sobre el conocimiento en sentido amplio tanto como sobre la sociedad y la naturaleza.

Podemos distinguir tres movimientos al interior de la ingeniería que pueden ser vistos, como un árbol, como desarrollos en el sentido fuerte de la palabra. Los tres modos de la ingeniería son: la ingeniería no-convencional, la ingeniería de sistemas complejos y la ingeniería bio-inspirada.

## 1.1. Ingeniería no-convencional

El marco teórico y metodológico de todas las formas modernas de ingeniería lo constituyó, durante más de 300 años, la ciencia normal (T. Kuhn). No hubo una ingeniería en la que la mecánica clásica, el cálculo diferencial e integral, las ecuaciones diferenciales, la geometría euclidiana y la lógica formal clásica ocuparan el lugar central. Gracias al advenimiento del computador y de la computación científica (Wolfram, 1984), sin embargo, los atisbos de nuevas formas de hacer ingeniería se hicieron visibles: una de ellas es la ingeniería no convencional. En particular, tres hitos se encuentran en el núcleo de los trabajos sobre ingeniería no convencional en el mundo:

- *El trabajo con sistemas no lineales.* Este hito representa el triunfo de los sistemas dinámicos en el sentido más amplio y a la vez más fuerte de la palabra. La aparición de métodos numéricos para resolver problemas matemáticos difíciles, el estudio de sistemas estocásticos y el surgimiento de técnicas de control y optimización no lineal forman parte de este hito. Pero el triunfo fue parcial. Se pretendió continuar trabajando en términos de problemas y casos ideales; se diseñaron, en muchas situaciones, técnicas para “linealizar” los problemas no lineales y se mantuvo la idea, a todas luces cartesiana, de resolver primero los problemas fáciles (=lineales) para luego, con el tiempo –y si este logra ser suficiente-, avanzar hacia los problemas difíciles (=no lineales).
- *El auge de la inteligencia artificial.* El tema de base aquí fue el de los sistemas inteligentes y, con él, el de las soluciones sorprendidas y novedosas. En efecto, algunos de los sistemas de la inteligencia artificial, como los sistemas expertos, las redes neuronales artificiales y los procedimientos no algorítmicos (=heurísticos), exhiben formas restringidas y limitadas de emergencia. Este tipo de sistemas constituyen lo que se conoce como *ingeniería emergente* (Villamil & Gómez Cruz, 2009; Ronald & Sipper, 2000). La base de estos modelos y sistemas ha sido, casi sin excepción, la arquitectura de Von Neumann<sup>1</sup> y su enfoque para generar soluciones el de la descomposición de arriba hacia abajo (enfoque analítico).
- *La incorporación de la lógica difusa.* El surgimiento de las lógicas no clásicas marcó un cisma maravilloso con respecto a la lógica formal clásica. Hasta el momento, la

---

<sup>1</sup> La arquitectura de Von Neumann emplea un complejo procesador para resolver, de forma secuencial, tareas difíciles y poco o nada tiene que ver con la forma paralela y altamente descentralizada en que trabaja el cerebro (a propósito de las redes neuronales) (Emmeche, 1998).

única lógica no clásica que ha logrado implementarse computacionalmente y, en consecuencia, explotarse en el plano ingenieril ha sido la lógica difusa (Maldonado & Gómez Cruz, 2010). A partir de aquí, muchos de los problemas complejos de control y optimización son formulados y resueltos como controladores difusos y neuro-difusos. A diferencia de los métodos de control tradicionales, estos controladores no requieren de un modelo matemático del sistema a controlar, sino que logran expresar el control de manera informal y con etiquetas lingüísticas basándose en conocimiento experto (Zak, 2003).

Pese a los avances que suponen estos hitos, el tipo de ciencia subyacente de la ingeniería no convencional continuó siendo la ciencia normal, en particular la física clásica; y los atributos de los sistemas ingenieriles que estas tendencias produjeron siguieron siendo, con menores variaciones, los mismos de la ingeniería convencional: predictibilidad, controlabilidad, estabilidad, confiabilidad, transparencia en estructuras y procesos y optimalidad (Minai, Braha & Bar-Yam, 2006). En general, las ideas, el lenguaje y las herramientas que proveen las ciencias de la complejidad no ocupan aquí un lugar central, o determinante si se quiere.

## **1.2. Ingeniería de sistemas complejos**

La ingeniería de sistemas complejos, por su parte, centra todos sus esfuerzos en el trabajo con, y la construcción de, sistemas complejos (Villamil & Gómez Cruz, 2009). Esto es, en sistemas compuestos de muchos elementos que interactúan de forma no lineal de acuerdo con reglas relativamente simples y sin un control global (Floreano & Mattiussi, 2008; Bedau, 2003); más exactamente, con sistemas de complejidad creciente que son, consiguientemente, irreductibles. Se trata, entonces, de la comprensión, explicación y construcción de sistemas y soluciones ingenieriles capaces de funcionar lejos del equilibrio, con el fin de auto-organizarse en, y adaptarse a, entornos cambiantes y cargados de incertidumbre.

La ciencia que subyace a la ingeniería de sistemas complejos no es ya la ciencia normal sino, frontalmente, las ciencias de la complejidad. Hablamos entonces de la confluencia de diversas ciencias y teorías fuertes tales como la termodinámica del no equilibrio, la ciencia –o teoría– del caos, la geometría fractal, la vida artificial, la ciencia de redes y las lógicas no clásicas. Además, el énfasis en sistemas complejos que plantea esta ingeniería implica la posibilidad de lograr nuevos atributos y posibilidades para los sistemas ingenieriles. Algunos de los más relevantes son escalabilidad, flexibilidad, adaptabilidad, evolucionabilidad, auto-organización, resiliencia, robustez, durabilidad, auto-monitoreo, auto-reparación, anidamiento (*nesting*), entre otras. La ingeniería de sistemas complejos logra constituirse como un nuevo paradigma ingenieril (Braha, Minai & Bar-Yam, 2006).

Dicho en términos muy genéricos y amplios, el tránsito de la ingeniería convencional y no convencional hacia la ingeniería de sistemas complejos se da gracias a dos situaciones principales:

- En primer lugar, los ingenieros se encontraron, sin esperarlo ni desearlo, con indicios de complejidad en algunos de los sistemas ingenieriles que habían diseñado y construido bajo lo mejor del arsenal reduccionista de la ciencia y la física clásicas. Dos ejemplos notables son los sistemas computacionales y las redes de comunicaciones modernas (Alzate, 2006).
- De otro lado, la ingeniería aprendió que es posible *construir* sistemas capaces de exhibir complejidad, y que las raíces de tales sistemas no necesariamente deben ser complejas. Es decir, se trata de que a partir de reglas relativamente simples que operan en la escala local se pueden generar comportamientos complejos en la escala global (Langton, 1996). El mejor ejemplo en la tarea de construir sistemas complejos es, sin duda, la vida artificial, una de las ciencias de la complejidad (Heudin, 2006). Volveremos sobre esta observación en el siguiente apartado.

### 1.3. Ingeniería bio-inspirada

En las últimas décadas, la simulación y la síntesis de sistemas biológicos se han convertido en elementos imprescindibles para la comprensión y la explicación de la lógica y la complejidad de la vida, inscribiéndose en el núcleo mismo de la nueva biología (Luisi, 2010; Solé y Goodwin, 2000; Stewart, 1999; Emmeche, 1998). En particular, han logrado ahondar en la comprensión de los mecanismos generadores de complejidad y de dinámicas globales emergentes (Langton, 1996). A diferencia de todas las ciencias biológicas tradicionales, esta nueva ciencia, conocida como *vida artificial*, no se concentra de forma exclusiva en el estudio de la vida como ha sido (o como es) en nuestro planeta sino que intenta *crearla* (=sintetizarla), además, en medios artificiales (vida tal como podría ser). Es decir, antes que un enfoque histórico, la vida artificial emplea un enfoque productivo (Varela, 2000).

Dos lecturas complementarias siguen a esta última afirmación. Una de ellas tiene que ver con la idea, científica y filosófica, según la cual la mejor (acaso la única) forma de comprender la dinámica y el espacio de comportamientos de un sistema complejo consiste en construirlo (Kari & Rozemberg, 2008; de Rosnay, 2000; Bonabeau & Theraulaz, 1997). La otra, y este es un argumento central, es el reconocimiento de que cuando se logra sintetizar un compartimento o dinámica biológica en un medio artificial<sup>2</sup> se está construyendo, implícita o explícitamente, un sistema potencialmente aplicable a la resolución de problemas ingenieriles complejos.

Al pie de la letra, los modelos y herramientas de la vida artificial pueden categorizarse en tres grupos de acuerdo con el papel que juegan en el continuo ciencia-ingeniería. El primer grupo es aquel que se concentra en la comprensión y la explicación de fenómenos biológicos y que no ha logrado un papel destacado (por el momento) en el plano ingenieril. El segundo grupo es mixto y sigue el decurso expuesto en el párrafo anterior. El tercero es aquel cuya finalidad no es la de ganar comprensión de un fenómeno biológico particular sino la de resolver un problema o un conjunto de ellos en el ámbito ingenieril. Los *sistemas de Lindenmayer* (Prusinkiewicz & Lindenmayer, 1990) y las *redes booleanas* (Kauffman, 2003) caen en el primer grupo; en el segundo grupo encontramos la *inteligencia de enjambres* (Bonabeau, Dorigo, & Theraulaz, 1999) y la *computación inmune* (Dasgupta & Niño, 2009), mientras en el tercer caso, un par de buenos ejemplos son la *programación genética* (Koza, 1998) y la *optimización por colonias de hormigas* (Dorigo & Stützle, 2004).

En este artículo, lo que resulta verdaderamente importante es que el estudio de los sistemas vivos mediante modelamiento, simulación y síntesis en medios artificiales (principalmente en software, pero también en hardware y wetware) ha permitido el surgimiento de nuevos y muy diversos paradigmas, abstraídos del funcionamiento de los sistemas naturales conocidos y posibles<sup>3</sup>, que sugieren nuevos conceptos, herramientas, metodologías y retos para la ingeniería de sistemas complejos.

Resumiendo, la ingeniería bio-inspirada –más genéricamente los sistemas bio-inspirados y más precisamente la vida artificial- se convierte en el fundamento mismo de la ingeniería de sistemas complejos. Puesto en otras palabras, es la ingeniería bio-inspirada la que configura el marco teórico de la ingeniería de sistemas complejos. Esa es la tesis central que defiende este texto. Por su parte, la ingeniería no convencional, tal como fue presentada aquí, le aporta a la ingeniería de sistemas complejos un vínculo sólido y contundente con las lógicas no clásicas y los sistemas dinámicos pero se integra sólo parcialmente con ella.

---

<sup>2</sup> Dinámicas o comportamientos tales como auto-organización, evolución, adaptación, aprendizaje, robustez, control distribuido, auto-reparación, auto-regulación, auto-ensamblaje, auto-reproducción, respuesta inmune...

<sup>3</sup> La vida artificial es justamente eso: una biología de las formas de vida posibles. En este caso la vida conocida es solo un caso particular de la vida posible.

## **2. EL PROBLEMA DE UN MARCO TEÓRICO EN LA INGENIERÍA, ESTO ES, LA INGENIERÍA BIO-INSPIRADA**

La ingeniería ha sido ampliamente reconocida como la aplicación del conocimiento y de las teorías que proveen la ciencia y las matemáticas con el fin de manipular y transformar la materia y las fuentes de energía en beneficio del hombre (Ronald & Sipper, 2000; Grech, 2001). Pese al reconocimiento, en el marco de la ingeniería de sistemas complejos esta definición adolece de algunas limitaciones.

En primer lugar, la relación tradicional entre ciencia e ingeniería fue unidireccional y su flujo, salvo contadas y notables excepciones, se dio siempre de la ciencia a la ingeniería (como lo sugiere la definición). La investigación en ingeniería consistió entonces en descubrir nuevas formas de aplicar la ciencia ya conocida y no en hacer aportes novedosos a la ciencia. Sin embargo, en años recientes, las fronteras entre la ciencia y la ingeniería e incluso entre estas y la filosofía se han hecho cada vez menos evidentes, más difusas. Justamente, porque el tipo de problemas que abordan la ciencia y la ingeniería contemporáneas, particularmente las ciencias de la complejidad y la ingeniería de sistemas complejos, son problemas de frontera que interpelan enfoques transversales e inter, tras y multidisciplinarios, y que involucran, a la vez, a científicos, ingenieros, filósofos, militares, empresarios, entre otros (Maldonado, 2010), el uso del computador como herramienta científica e ingenieril ha sido determinante para el abordaje de dichos problemas –fenómenos, comportamientos, sistemas- (Emmeche, 1998; Pagels, 1991).

De otro lado, la ingeniería dejó de estar restringida a la manipulación y transformación de materia y energía. Además y fundamentalmente, la ingeniería moderna y, con marcado acento, la ingeniería de sistemas complejos han involucrado el trabajo con información y procesos de cómputo. El computador y los trabajos pioneros de C. Shannon jugaron un papel protagónico. Después de todo, si hay algo que hacen bien los sistemas complejos es procesar información (= computar) (Mitchell, 2009). Y claro, los sistemas que procesan información de forma más sofisticada y robusta son, precisamente, los sistemas biológicos (Teuscher, 2009). Dicho en términos prácticos, pensar la ingeniería de sistemas complejos equivale a pensar en términos de computación no convencional y computación bio-inspirada.

### **2.1. Computación no convencional y computación bio-inspirada**

Los sistemas naturales, principalmente los sistemas vivos, brindan ejemplos extraordinarios del tipo de sistemas (o problemas) que se estudian y se intentan construir (o resolver) en computación no convencional y en la nueva ingeniería (Marrow, 2000; Syropoulos, 2008). No sin razón, el núcleo de (casi) todas las nuevas tecnologías se ha desplazado consistentemente hacia el trabajo con modelos, metáforas, herramientas, sistemas y paradigmas computacionales motivados por la biología y la ecología. En algunos casos, incluso, se están empleando materiales biológicos para resolver problemas complejos y para formular nuevas arquitecturas y modelos de computación (véase, por ejemplo, Amos, 2005 o Ignatova, Martínez-Pérez, & Zimmermann, 2008).

En dicho contexto, los sistemas bio-inspirados y la vida artificial juegan un papel central para el desarrollo y las posibilidades hacia futuro de la ingeniería de sistemas complejos. El nombre genérico en el que se enmarca esta tendencia es el de la tecnología viva (*living technology*) (Bedau et al, 2010). En particular, el problema del procesamiento de información se hace vital (=indispensable) para cualquier forma de ingeniería de sistemas complejos, ya sea en la etapa de diseño o de construcción y con toda seguridad en el sistema resultante. La computación en general, la computación no convencional y la computación motivada biológicamente, por tanto, se ubican en el núcleo de las preocupaciones de la ingeniería de sistemas complejos y constituyen algunos de sus retos teóricos principales. Uno de los retos más apremiantes por el impacto que representa es la formulación de una teoría de cómputo en sistemas biológicos (Bedau, et al., 2000). Pues bien, al menos por cuatro vías diferentes, la vida artificial está permeando a la computación no convencional, a la hipercomputación, a la teoría (computacional) de la complejidad y, en consecuencia, a la ingeniería de sistemas complejos: desde el diseño y el análisis de algoritmos eficientes, pasando por la aparición de nuevos

paradigmas de programación, hasta el desarrollo de nuevas arquitecturas y modelos de computación que buscan, en muchos casos, computar lo no computable:

- Técnicas para modelar y simular (computacionalmente) sistemas complejos basadas en metáforas biológicas. Los *autómatas celulares* (Hoekstra, Kroc & Sloot, 2010) y el *modelamiento y simulación basados en agentes (agent based modeling and simulation)* (Macal, 2009), ambos surgidos en el marco de la vida artificial, son los ejemplos más destacados. Estas técnicas son, a la vez, marcos algorítmicos y computacionales genéricos y potentes herramientas conceptuales para el abordaje de sistemas complejos.
- Técnicas bio-inspiradas para resolver problemas complejos (**NP** y **NP-completos**) relacionados con optimización, búsqueda, programación de rutas, asignación de espacios, descubrimiento de patrones y toma de decisiones (Hemos aproximado, incluso, la idea según la cual la vida misma es un problema **NP** (Maldonado & Gómez Cruz, 2009)). Técnicamente se conocen como *metaheurísticas* (Talbi, 2009) y comprenden diversos algoritmos de la *computación evolutiva* (De Jong, 2006), la *computación inmune* (Dasgupta, & Niño, 2009), la *inteligencia de enjambres* (Bonabeau, Dorigo, & Theraulaz, 1999; Dorigo & Stützle, 2004), la *computación neuronal* (Forbes, 2004) y la *computación con membranas* (Păun, 2005; 2006).
- Modelos de computación inspirados por los sistemas biológicos. Algunos se ha demostrado que son Turing-completos y se conjetura que, en general, todos ellos podrían llegar a realizar tareas que se consideran actualmente no computables (Syropoulos, 2008; Copeland & Proudfoot, 2004). Incluso, hay casos en los que, más allá del plano metafórico, se están empleando componentes biológicos naturales (como ADN o células) para procesar información. Estos modelos comprenden el *cálculo de interacción de proteínas* (Fernández, 2009), la *computación con membranas* (Păun, 2005), la *computación molecular* (incluidas la *computación con ADN*, la *computación con RNA* y la *computación con péptidos*) (Gheorghe, 2005; Amos, 2005) y la *computación celular* (en el sentido presentado por Amos, 2004). La *computación cuántica* y su vertiente más reciente, la *vida artificial cuántica* (Abbot, Davies & Pati, 2008), caen en esta categoría.
- Arquitecturas de computación motivadas biológicamente. Aquí se encuentra, de forma muy particular, la arquitectura de computación propuesta por Sipper (1990; 1997) denominada *computación celular*. En contraposición con la arquitectura tradicional de Von Neumann, la computación celular promueve tres principios fundamentales: i) *simplicidad*: unidades de procesamiento de información (denominadas células) diseñadas para llevar a cabo tareas simples, ii) *vasto paralelismo*: un número de procesadores del orden de  $10^x$  funcionando al unísono y iii) *localidad*: el control del sistema se da en la escala local, es decir, los procesadores solo se comunican con sus vecinos cercanos. La flexibilidad y robustez de una arquitectura semejante permitiría, en principio, llevar a cabo computaciones de forma más eficiente en términos de velocidad, costo, poder de disipación, almacenamiento de información y calidad de soluciones (Sipper, 1990).

En años recientes, algunas de las tendencias más destacadas relativas a la computación no convencional y a la resolución (computacional) de problemas complejos han tomado inspiración de, o han convergido hacia, la vida artificial (Figura 1). Por una parte, el trabajo en lógica difusa fue complementado con las redes neuronales y la computación evolutiva con el fin de resolver un rango más amplio de problemas, dando paso, así, al surgimiento de la *computación suave*. La inteligencia artificial, por su parte, se ha venido desplazando sistemáticamente hacia lo que se conoce como *nueva inteligencia artificial* (Coppin, 2004), *inteligencia computacional* (Engelbrecht, 2007) o *inteligencia artificial bio-inspirada* (Floreano & Mattiussi, 2008), tres formas de referir la búsqueda de soluciones “inteligentes” mediante modelos inspirados biológicamente (por células, neuronas, respuesta inmune, evolución...).

## Artificial life

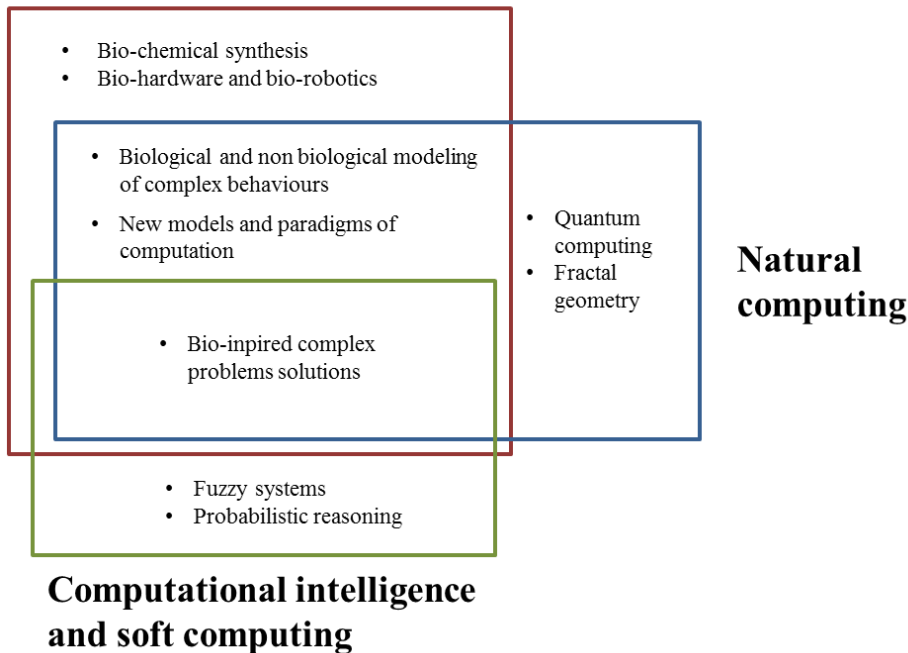


Figura 1. Convergencia de la computación suave, la inteligencia computacional y la computación natural hacia el trabajo con sistemas de vida artificial.

En un plano mucho más amplio, aunque paralelo, se encuentra la *computación natural* (De Castro, 2007; De Castro, & Von Zuben, 2005), cuyo problema de investigación es la computación inspirada por, o que ocurre en, la naturaleza. Dicho de una manera más genérica, la computación natural es el intento por comprender los sistemas naturales en términos de procesamiento de información (Kari & Rozemberg, 2008). El hecho significativo, de cara al traslape con la vida artificial, es que casi todas sus líneas de trabajo están del lado de los sistemas biológicos y no de los sistemas físicos<sup>4</sup> (si bien los primeros suponen, pero no se agotan, en los segundos).

## 2.2. Fundamentos teóricos para la ingeniería de sistemas complejos

La ingeniería de sistemas complejos deja de ser solamente ingeniería para convertirse, además en ciencia, con claros y serios problemas de índole eminentemente filosófica. Fundada al mismo tiempo en metáforas y herramientas que se nutren de la nueva biología y de la ecología como ciencia (Odum, 1997), se trata de un novedoso campo que entra, a todas luces en la arena de la “Gran Ciencia” (*Big Science*) (Price, 1963) dejando así de ser, como la ingeniería clásica, “pequeña ciencia” (*Little Science*), incumbencia únicamente de los ingenieros mismos y mera aplicación de ideas gestadas en otras partes.

La ingeniería de sistemas complejos ha llegado a incorporar lógicas más flexibles que la simple lógica formal clásica. Con seguridad, las lógicas que mejor han sido elaboradas son, ampliamente, la lógica difusa y, en menor medida, algunos capítulos de la lógica polivalente; notablemente, escalas bajas de polivalencia<sup>5</sup>.

Queremos sostener la tesis según la cual los sistemas bio-inspirados pueden beneficiarse enormemente con la incorporación de las lógicas no-clásicas en sus conceptualizaciones,

<sup>4</sup> Según Kari y Rozemberg (2008), los componentes más vistosos de la computación natural son: los autómatas celulares, la computación neuronal, la computación evolutiva, la inteligencia de enjambres, los sistemas inmunes artificiales, la vida artificial, la computación con membranas, la computación amorfa (que se centra en problema del desarrollo de la forma o morfogénesis), la computación (bio)molecular o computación con ADN, la computación cuántica, la biología de sistemas, las redes regulatorias de genes, las redes bioquímicas, la biología sintética y la computación en células vivas.

<sup>5</sup> Pensamos particularmente en lógicas trivalentes que trabajan, como es sabido, con tres valores: verdad, falsedad e incertidumbre.

desarrollos y diseños. Una aproximación –ciertamente indirecta- se encuentra en el trabajo de Van Benthem (2008).

En general, la ingeniería de sistemas complejos tanto como las ciencias de la complejidad no han atendido a la importancia y el significado de las lógicas no-clásicas. La idea, sencillamente, es la de que el marco teórico de la ingeniería bio-inspirada se compone o se articula de tres ejes, así:

- *La teoría de las demostración*, que se ocupa de las inferencias válidas
- *La teoría de modelos*, que se enfoca en el poder expresivo del lenguaje, y
- *La teoría de la recursividad*, que se ocupa de problemas de computación y, dicho de manera puntual, los temas y problemas relativos al problema de la detención (Halting Problem), la decibilidad y la indecibilidad, los problemas **P** versus **NP**, y la hipercomputación.

La lógica en general y las lógicas no-clásicas en especial no pueden ya ser obliteradas (*logics matter(s)*). Pero ya no simplemente y llanamente como un *organon* –que era justamente el caso en la ingeniería convencional- sino como uno de los pilares del trabajo y la investigación ingenieril.

Pues bien, con toda seguridad, el otro pilar es la filosofía misma, y ello en el sentido precisamente de que las lógicas no-clásicas son *lógicas filosóficas*. Sus problemas son eminentemente filosóficos, aunque no en el sentido que les gustaría a los metafísicos de la *philosoophia perennis*, sino, mucho mejor aún, en el sentido preciso de que las ciencias de la complejidad constituyen el abordaje y solución de las preguntas eminentemente filosóficas que se encuentran en el corazón de la ciencia.

En cualquier caso, es evidente que el desarrollo de un marco teórico para la ingeniería de sistemas complejos es tan sólo un caso particular de una tarea de mayor envergadura, a saber: el desarrollo de una teoría general o transversal de la complejidad – algo que tampoco existe hasta la fecha (Maldonado, 2007; 2009).

### **2.3. Arquitectura de la ingeniería de sistemas complejos**

La arquitectura (pre)visible de los sistemas bio-inspirados se aleja de la arquitectura clásica de Von Neumann y se asimila a la nueva biología (Kauffman, 1995, 2003; Solé and Goodwin, 2000; Langton, 1996). En contraste con la inteligencia artificial –que trabajaba *top-down*-, e incluso con muchas de las comprensiones y trabajos en vida artificial (Langton, 1991; Adami, 1998) que trabaja(ba)n *bottom-up*, los sistemas bio-inspirados trabajan al mismo tiempo de abajo-hacia-arriba- y en procesamientos *en paralelo*. La lógica de la vida es la abducción y, en consecuencia, los sistemas vivos no son tanto estables (teoría de la estabilidad), cuanto que robustos (Jen, 2005).

El fundamento o la metáfora para dicha arquitectura, desde el punto de vista de la generación de comportamientos complejos en sistemas artificiales, proviene de la biología del desarrollo y consiste en la distinción, no trivial, entre genotipo y fenotipo (Langton, 1996). El problema de base es, justamente, cómo complejas dinámicas y comportamientos globales (el fenotipo) surgidos a partir de elementos locales que interactúan (el genotipo), soportan, a su vez, un conjunto de estructuras dinámicas globales emergentes que se estabilizan a sí mismas mediante el establecimiento de las condiciones de entorno en las que la dinámica local opera y se hace posible (Taylor, 1991).

El tiempo en los sistemas complejos no es, en manera alguna, una variable. Por el contrario, es una especificidad de las ciencias de la complejidad: primero, reconocer explícitamente que los sistemas de complejidad creciente se fundan en escalas temporales distintas, y en muchas ocasiones incluso incongruentes algunas de ellas; y en segundo término, es una especificidad el trabajar activamente con esa pluralidad de escalas temporales. Aquí, como se aprecia fácilmente, estamos ya lejos, bastante lejos de la ingeniería convencional.

La ingeniería de sistemas bio-inspirados no termina de incorporar esta idea. Análogamente a como en biología y en ecología –notablemente en las investigaciones teóricas sobre estos campos- podemos reconocer inmediatamente dos tiempos generales –el del desarrollo y el de la evolución; el primero organísmico, y el segundo a nivel de las especies-, y luego, igualmente, escalas temporales desde la citología hasta el organísmico, y desde los biomas hasta la biosfera, por ejemplo, asimismo en la ingeniería de sistemas bio-inspirados el diseño y el desarrollo deben y pueden trabajar en la misma dirección y en los mismos niveles. Es por ello que, entre otras cosas, los principios del desarrollo de organismos biológicos complejos y los principios de la evolución se han convertido en una necesidad y en un componente central para “ingenieriar” sistemas complejos (Banzhaf & Pillay, 2007).

Pues bien, los tiempos de los sistemas vivos abarcan dos grandes dimensiones: la microscópica y la macroscópica. La primera se compone de tiempos y escalas milimétricas, microescalares, nanométricas, picoescalares, femtométricas y attoescalares (hasta la fecha). Como sabemos, el “tiempo real” desde el punto de vista informacional y computacional trabaja y se mueve entre estas escalas y medidas. La dimensión macroscópica cubre desde los tiempos medidos en segundos hasta millones de años y miles de billones de años.

En otras palabras, dado que vivimos en un universo no-ergódico caracterizado por incertidumbre y meramente probabilístico, al mismo tiempo, la ingeniería de sistemas bio-inspirados puede ser reconocida como una arquitectura móvil (eso: ¡dinámica!) cuyo vórtice es, manifiestamente la biosfera. Se trata de una arquitectura en paralelo, híbrida e incluso de ritmos, procesamientos y desarrollos hiper-computacionales. Digámoslo de manera franca: aquello de lo cual estamos hablando es, justamente, de espacios de solución y el trabajo con metaheurísticas, metaheurísticas paralelas, metaheurísticas híbridas e hiperheurísticas (Coello *et al.* 2010; Talbi, 2009; Cotta *et al.*, 2008), así como de dispositivos que logren romper la barrera de Church-Turing y, en consecuencia, abrir la puerta a los hipercomputadores y a los nuevos modelos de (hiper)computación (Syropoulos, 2008).

Todo apunta a que es efectivamente deseable y posible otra arquitectura computacional distinta a la de Von Neumann. Con palabras propias, ella habrá de significar el triunfo de la biología sobre la física. Parece ser que, seguramente jalonados por problemas relativos a la criptología y la criptografía, la ventaja vendrá por el lado de la computación cuántica. Pero si ello es así, en el centro se sitúa entonces, irremisiblemente, la lógica cuántica –una de las más sugestivas de las lógicas no-clásicas- (Engesser, Gabbay & Lehmann, 2009). Sólo que no hay que olvidar que la frontera última es, entonces, la biología cuántica. Pero este ya es otro tema que merece nuestra atención en otro espacio distinto y sobre el cual nos encontramos trabajando.

## REFERENCIAS

- Abbot, D., Davies, P. & Pati, A. (Eds.), (2008). *Quantum Aspects of Life*. London: Imperial College Press.
- Adami, C. (1998). *Introduction to Artificial Life*. New York: Springer Verlag.
- Alzate, M. A. (2006). Complejidad en Redes Modernas de Comunicaciones. In C. E. Maldonado (Ed.), *Complejidad: Ciencia, Pensamiento y Aplicaciones* (pp. 209-250). Bogotá: Universidad Externado de Colombia.
- Amos, M. (2005). *Theoretical and Experimental DNA Computation*. Natural Computing Series. Berlin: Springer-Verlag.
- Amos, M. (Ed.), (2004). *Cellular Computing*. Oxford: Oxford University Press.
- Banzhaf, W., & Pillay, N. (2007). Why Complex Systems Engineering Needs Biological Development. *Complexity*, 13 (2), 12-21.
- Bedau, M. (2003). Artificial Life: Organization, Adaptation and Complexity from the Bottom-Up. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 505-512.
- Bedau, M. et al. (2010). Living Technology: Exploiting Life's Principles in Technology. *Artificial Life*, 16(1), 89-97.
- Bedau, M., McCaskill, J., Packard, N., Rasmussen, S., Adami, C., Green, D., et al. (2000). Open Problems in Artificial Life. *Artificial Life*, 6 (4), 363-376.

- Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford: Oxford University Press.
- Bonabeau, E., & Theraulaz, G. (1995). Why Do We Need Artificial Life? In C. Langton (Ed.), *Artificial Life: An Overview* (pp. 303-325). Cambridge: MIT Press.
- Braha, D., Minai, A., & Bar-Yam, Y. (Eds.). (2006). *Complex Engineered Systems: Science Meets Technology*. Cambridge, MA: Springer-Verlag.
- Coello, C., Daehns, C., & Jourdan, L., (Eds.). *Advances in Multiobjective Nature Inspired Computing*: Berlin: Springer-Verlag
- Copeland, J., & Proudfoot, D. (2004). Un Alan Turing Desconocido. *Investigación y Ciencia, Temas 36: La Información* , 29-30.
- Coppin, B. (2004). *Artificial Intelligence Illuminated*. Sudbury, MA: Jones and Bartlett.
- Cotta, C. Sevaux, M., Sörensen, K., (Eds.), (2008). *Adaptive and Multilevel Metaheuristics*. Berlin: Springer-Verlag.
- Dasgupta, D., & Niño, L. F. (2009). *Immunological Computation: Theory and Applications*. Boca Raton: CRC Press.
- De Castro, L. N. (2007). "Fundamentals of Natural Computing: An Overview". *Physics of Life* (4), 1-36.
- De Castro, L. N., & Von Zuben, F. (2005). *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*. Hershey, PA: Idea Group Publishing.
- De Jong, K. A. (2006). *Evolutionary Computation: A Unified Approach*. Cambridge, MA: MIT Press.
- De Rosnay, J., (2000). *The Symbiotic Man*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Dorigo, M & Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Emmeche, C. (1998). *Vida Simulada en el Ordenador: la Ciencia Naciente de la Vida Artificial*. Barcelona: Gedisa.
- Engelbrecht, A. (2007). *Computational Intelligence: An Introduction*. Segunda edición. Chichester: John Wiley & Sons.
- Engesser, K., Gabbay, D. & Lehmann, D., (2009). *Handbook of Quantum Logic and Quantum Structures*. Amsterdam: North-Holland.
- Fernández, M. (2009). *Models of Computation: An Introduction to Computability Theory*. Berlin: Springer Verlag.
- Floreano, D., & Mattiussi, C. (2008). *Bio-Inspired Artificial Intelligence: Theories, Methods, and Technologies*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Forbes, N., (2004). *Imitation of Life: How Biology is Inspiring Computing*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Gheorge, M. (2005). *Molecular Computation Models: Unconventional Approaches*. Hershey: Idea Group
- Grech, P. (2001). *Introducción a la Ingeniería: Un Enfoque a Través del Diseño*. Bogotá: Pearson.
- Heudin, J.-C. (2006). Artificial Life and the Sciences of Complexity: History and Future. In B. Feltz, M. Crommelinck, & Goujon, P. (Eds.). *Self-Organization and Emergence in Life Sciences*. Berlin: Springer Verlag. 227-247.
- Hoekstra, A., Kroc, J. & Sloot, P. (2010). *Simulating Complex Systems by Cellular Automata*. Berlin: Springer-Verlag.
- Jen, E., (Ed.), (2005). *Robust Design. A Repertoire of Biological, Ecological, and Engineering Case Studies*. A Volume in The Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Oxford: Oxford University Press.
- Kari, L. & Rozenberg, G., 2008. The Many Facets of Natural Computing. *Commun. ACM*, 51, pp.72-83.
- Kauffman, S., (1995). *At Home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization*. Oxford: Oxford University Press.
- Kauffman, S. (2003). *Investigaciones: Complejidad, Autoorganización y Nuevas Leyes para una Biología General*. Barcelona: Tusquets.
- Koza, J. (1998). *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Sexta Impresión. Cambridge, MA: MIT Press.
- Ignatova, Z., Martínez-Pérez, I. & Zimmermann, K.H. (2008). *DNA Computing Models*. Berlin: Springer-Verlag
- Langton, C. (1996). Artificial Life. In M. Boden (Ed.), *The Philosophy of Artificial Life* (pp. 39-94). Oxford: Oxford University Press.
- Langton, C. (1991). Life at the Edge of Chaos. In C. Langton, C. Taylor, D. Farmer, & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life II, SFI Studies in the Science of Complexity, Vol X* (pp. 41-91). Rewood City: Addison-Wesley.
- Luisi, P.L. (2010). *La Vida Emergente: De los Orígenes Químicos a la Biología Sintética*. Barcelona: Tusquets.

- Maldonado, C.E., (2010). Ingeniería de sistemas complejos. Retos y oportunidades, en: Pineda, L. y Padilla, P., (Eds.). *El Futuro de la Educación en Ingeniería y la Gestión de la Ingeniería. Una Perspectiva Sistémica*. Metz (Francia): Ed. Universidad del Rosario, Instituto Tecnológico de Metz.
- Maldonado, C. E., (2009). Exploración de una Teoría General de la Complejidad. In: Maldonado, C. E., (Ed.). *Complejidad: Revolución Científica y Teoría*. Bogotá: Ed. Universidad del Rosario, págs. 113-143.
- Maldonado, C. E., (2007). El Problema de una Teoría General de la Complejidad. In: Maldonado, C. E., (Ed.), *Complejidad: Ciencia, Pensamiento y Aplicaciones*. Bogotá, Ed. Universidad Externado de Colombia, págs. 101-132.
- Maldonado, C. E., & Gómez Cruz, N. (2010). *Modelamiento y Simulación de Sistemas Complejos (Documentos de Investigación)*. Bogotá: Universidad del Rosario.
- Maldonado, C. E., & Gómez Cruz, N. (2009). Facing N-P Problems via Artificial Life: a Philosophical Appraisal. In *Advances in Artificial Life: 10th European Conference on Artificial Life, ECAL 2009* (pp. --). Berlin: Springer-Verlag.
- Marrow, P. (2000). Nature-inspired Computing Technology and Applications. *BT Technol J*, 18 (4), 13-23.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A Guided Tour*. Oxford: Oxford University Press.
- Odum, E.P., (1997). *Ecology: The Bridge between Science and Society*. Massachusetts: Sennar Associates.
- Pagels, H. (1991). *Los Sueños de la Razón: El Ordenador y los Nuevos Horizontes de las Ciencias de la Complejidad*. Barcelona: Gedisa.
- Păun, G. (2006). Introduction to Membrane Computing. In G. Ciobanu, G. Păun, & M. Pérez-Jiménez (Eds.), *Applications of Membrane Computing, Natural Computing Series* (pp. 1-42). Berlin: Springer-Verlag.
- Păun, G. (2005). Membrane Computing: Power, Efficiency, Applications. In B. Cooper, B. Löwe, & L. Torenvliet (Eds.), *New Computational Paradigms: First Conference on Computability in Europe, CiE 2005 Amsterdam, The Netherlands, June 8-12, 2005 Proceedings* (pp. 396-407). Berlin: Springer Verlag.
- Price, D.J. de S. (1963). *Little Science, Big Science*. New York: Columbia University Press.
- Prusinkiewicz, P., & Lindenmayer, A. (1990). *The Algorithmic Beauty of Plants*. New York: Springer Verlag.
- Ronald, E., & Sipper, M. (2000). Engineering, Emergent Engineering, and Artificial Life: Unsurprise, Unsurprising Surprise, and Surprising Surprise. In M. Bedau, M. John, N. Packard, & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life VII: Proceedings of the Seventh International Conference on Artificial Life* (pp. 523-528). Cambridge, MA: MIT.
- Sipper, M. (1997). *Evolution of Parallel Cellular Machines: The Cellular Programming Approach*. Berlin: Springer-Verlag.
- Sipper, M. (1990). The Emergence of Cellular Computing. *IEEE Computer*, 18-26.
- Solé, R. & Goodwin, B. (2000). *Signs of Life: How Complexity Pervades Biology*. New York: Basic Books.
- Stewart, I. (1999). *El Segundo Secreto de la Vida: Las Nuevas Matemáticas del Mundo Viviente*. Barcelona: Crítica.
- Syropoulos, A. (2008). *Hypercomputation: Computing Beyond the Church-Turing Barrier*. Berlin: Springer-Verlag.
- Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics: From Design to Implementation*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Taylor, C. (1991). Fleshing Out Artificial Life II. In C. Langton, C. Taylor, D. Farmer, & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life II*, SFI Studies in the Science of Complexity, Vol X (pp. 25-38). Redwood City: Addison-Wesley.
- Teuscher, C. (2009). Cellular Computing. In R. Meyer (Ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (pp. 922-936). Berlin: Springer Verlag.
- Van Benthem, J., (2008). "Logical dynamics meets logical pluralism?", en: *Australasian Journal of Logic*, 6, pp. 182-209.
- Varela, F. (2000). ¿Qué es la Vida Artificial? In F. Varela, *El Fenómeno de la Vida* (pp. 41-48). Santiago de Chile: Dolmen.
- Villamil, J., & Gómez Cruz, N. (2009). Ingeniería de Sistemas Complejos. In: C. E. Maldonado, *Complejidad: Revolución Científica y Teoría*, Bogotá, Ed. Universidad del Rosario, 71-82.
- Wolfram, S. (1986). Approaches to Complexity Engineering. *Physica D* 22, 385-399.
- Wolfram, S. (1984). Computer Software in Science and Mathematics. *Scientific American* 251, 188-203.
- Zak, S. (2003). *Systems and Control*. Oxford: Oxford University Press.