

Ingeniería de sistemas complejos

Panorama y oportunidades

Carlos Eduardo Maldonado

Universidad del Rosario
carlos.maldonado@urosario.edu.co

1 INTRODUCCIÓN

La ingeniería es la forma como la ciencia, el arte e incluso la filosofía actúan sobre el mundo. Desde luego, esto no quiere decir que no existan otras vías de acción en el mundo, pero, con seguridad, en el mundo contemporáneo, la acción es de tipo ingenieril. Esta idea exige, sin embargo, una clarificación.

No existe una única forma de ingeniería, sino tres, a saber: la ingeniería convencional y una contraparte de la misma que sigue siendo ingeniería clásica, la ingeniería de procesos reversibles, y la ingeniería no-convencional, mejor llamada como ingeniería de sistemas complejos. Como quiera que sea, cruzándolas a las tres se encuentra el tema del control. Al fin y al cabo, la ingeniería es acción y control sobre los objetos, los procesos y las dinámicas de que se ocupa.

Ahora bien, el control permea a la ingeniería de cualquier manera como la queramos entender. De hecho, el control emerge como el rasgo característico de toda la ciencia moderna. En pocas palabras, la ingeniería es acerca del control – control de materiales, control de procesos, control de comportamientos.

Con este texto estamos interesados en un problema, a saber: el de cómo puede contribuir la ingeniería en el panorama actual de las ciencias y las disciplinas. Pues bien, nuestra tesis aquí es la de que la mejor contribución se lleva a cabo a través del reconocimiento expreso del papel y el significado de la ingeniería no convencional, la cual ya no trabaja en torno a un control centralizado. El título de esta ingeniería es la ingeniería de sistemas complejos.

Con este texto me propongo tres finalidades. De un lado, introducir a la ingeniería de sistemas complejos, en segundo lugar, presentarla en el contexto del estudio de los sistemas de complejidad creciente, y finalmente mostrar cuál es el alcance cultural y social de esta nueva ingeniería. Para ello, desarrollaré tres argumentos, así:

- i) La ingeniería de sistemas complejos constituye un acercamiento maravilloso de los temas de control y acción a la biología y la ecología en general, como nunca antes se había presentado en la historia de la ingeniería y de la historia de la técnica y la tecnología en general;
- ii) La ingeniería de sistemas complejos constituye una arista fundamental de un conjunto más amplio que son las ciencias de la complejidad. Por consiguiente, se hace necesaria una articulación entre ambos planos o escenarios;

- iii) La ingeniería de sistemas complejos se encuentra en la punta misma del conocimiento y puede suministrar valiosas herramientas de cara al reto singular del cuidado y el posibilitamiento de la vida en el planeta, sin duda el más grande desafío jamás enfrentado en la historia de la humanidad.

2 DE LA INGENIERÍA CLÁSICA A LA INGENIERÍA NO CONVENCIONAL: LA INGENIERÍA DE SISTEMAS COMPLEJOS

La ingeniería es el resultado y el triunfo de la tecnología, no simplemente de la técnica. Como es sabido, la ingeniería es el resultado de la Revolución Industrial, pero alcanza su apogeo durante el periodo conocido como el capitalismo post-industrial. En su sentido más amplio, la ingeniería clásica se desarrolla como la ingeniería de procesos reversibles. Sus rasgos más destacados se expresan en dominios como la ingeniería de materiales, la ingeniería de procesos y la ingeniería de sistemas – las tres, en su sentido más amplio e incluyente.

La ingeniería clásica fue el epítome práctico de la física clásica y más exactamente de la mecánica clásica. Con ambas –mecánica clásica e ingeniería (en sentido tradicional) el círculo parecía cerrarse. La ciencia y la tecnología apuntaban a la predicción, al control, a la acción directa sobre el mundo y la naturaleza. El ideal del progreso en el conocimiento parecía garantizar como progreso de la humanidad.

Sin embargo, de un lado, la física sufrió un cisma; y por otro, paralela y concomitantemente la ingeniería conocería una radical transformación. El cisma de la física tuvo tres referentes claros, con acentos y en magnitudes distintas: K. Gödel y la formulación del teorema de la incompletud; A. Turing y el descubrimiento del problema de la indecidibilidad, y W. Heisenberg y el planteamiento del principio de incertidumbre. Sobre estos tres pilares se produce una crisis radical e irreversible en el cuerpo de la física, y con ella de todas las ciencias y disciplinas que se fundaban, que eran implicadas o que suponían la validez sin más de los planteamientos de la física clásica. A fortiori, la crisis implicó también, de manera necesaria a la ingeniería. Sólo que en esta breve descripción el foco se situó siempre del lado de las ciencias que en el de las tecnologías.

La ingeniería es la forma como la ciencia actúa en el mundo. De esta suerte, la ingeniería es el complemento de la ciencia (Echeverría, 2003). Exactamente en este sentido se introduce, gracias a G. Hottois el concepto de tecno-ciencia en 1982. Este concepto designa el hecho de propiamente no existen dos cosas –separadas y acaso aisladas- ciencia y tecnología, sino, por el contrario, existe una sola unidad: la tecnociencia; es decir continuo ciencia-tecnología, y que corresponde en realidad al continuo: explicación y comprensión del mundo y de la naturaleza y acción, control, ejecución y manipulación sobre la naturaleza y el mundo.

El desarrollo de la tecnociencia va mano a mano con los avances teóricos y conceptuales o teóricos. A la revolución que significó el descubrimiento del ADN por parte de Watson y Crick en 1953, le seguiría la implementación de la ingeniería genética; a los progresos de las ciencias sociales y humanas le seguiría la ingeniería de procesos, la ingeniería de gestión en fin, incluso la ingeniería administrativa.

De acuerdo con Kuhn, cuando éste escribe la *Estructura de las revoluciones científicas* en 1962, por cada revolución teórica o conceptual había cuatro revoluciones técnicas o tecnológicas. Para el año 2008 la proporción había aumentado de uno a doce; es decir, por cada revolución teórica o conceptual doce son de orden técnico y/o tecnológico. Manifiestamente, la historia de la ciencia y de la tecnología de la segunda mitad del siglo XX hasta nuestros días consiste en una ventaja grande del plano ingenieril sobre el estrictamente teórico y conceptual. A fortiori, se trata de una clara ventaja selectiva de la investigación experimental y aplicada sobre la investigación básica. Hay un concepto en el que se condensa esta historia y avances: es la historia de la tecnociencia.

Sin embargo, este cuadro sufre una transformación radical en el curso de los últimos lustros del siglo XX. La tecnociencia que era la mejor expresión del conocimiento en todas sus expresiones, se ve reducida a ser tan solo una parcela al lado de un espectro significativamente más amplio, a saber: la gran ciencia (*big science*). Relativamente a la gran ciencia la tecnociencia es reconocida como pequeña ciencia (*little science*).

El concepto de gran ciencia fue introducido por primera vez por S. Price en 1968, pero es efectivamente incorporada en gran escala en el curso de los años 1990s, cuando se introduce el concepto de investigación de gran escala (*Large-Scale Research*) (Galison and Hevly, 1992).

Mientras que la pequeña ciencia designa a la ciencia y a la tecnología –las ingenierías, justamente- de la modernidad, la gran ciencia es el concepto que se usa para designar la ciencia de punta cuyo rasgo distintivo es la interdisciplinariedad, el trabajo y la investigación con problemas de frontera, en fin, la constitución de nuevas síntesis, magníficas tanto en el orden teórico como práctico. En este sentido, precisamente, la pequeña ciencia es la ciencia de carácter disciplinario y que se define casualmente en términos medievales; es decir, por género próximo y diferencia específica. Así, por ejemplo, se es físico porque no se es químico, se es matemático puro porque no se trabaja en matemáticas aplicadas, se es abogado porque no se es sociólogo, se es economista porque no se es antropólogo, y así sucesivamente. Resumiendo y concretando al mismo tiempo: se es científico porque no se es ingeniero, o viceversa.

En contraste, la gran ciencia es aquella que se caracteriza por dos rasgos fundamentales: de un lado, por el carácter cruzado, integral, transversal y abierto que se expresa justamente en la inter, la trans y la multidisciplinariedad. (Para el caso no interesan aquí las distinciones entre ellas). Y de otra parte, de manera significativa, es la ciencia que convoca y en la que coinciden al mismo tiempo militares, científicos, ingenieros, administradores, financieros y miembros del sector público (gubernamental, estatal) (Echeverría, 2003).

La tecnociencia es ciencia e ingeniería del control, y el control central se ha revelado en numerosos casos, prácticamente como un reconocimiento ubicuo, como un error grave. Las nuevas tecnologías en general son posibles gracias al abandono de un control social, y por derivación las ciencias sociales en general –incluidas la política y la economía, la administración y la sociología, deben aprender acerca de la importancia, el significado y el alcance de los sistemas de control difuso, que es la manera como la ingeniería clásica se abre a, y se transforma en, ingeniería no convencional.

Así, las compuertas, si cabe la expresión, que comunican a la ingeniería clásica con el estudio de los sistemas dinámicos y más exactamente con las ciencias de la complejidad son dos: en un caso, la incorporación de una lógica no-clásica, y el distanciamiento con la lógica formal clásica. Se trata del desarrollo de la lógica difusa, gracias a los trabajos pioneros de L. Zadeh. De otra parte, al mismo tiempo, y en el marco de la emergencia de las ciencias dedicadas a los sistemas de complejidad creciente tales como la termodinámica del no-equilibrio, el caos, los fractales, las catástrofes incluso y las redes complejas, se trata también del giro fundamental que conduce la mirada desde la física clásica hacia modelos biológicos. De esta suerte, el tema que emerge es el de la computación bio-inspirada (Vogel, 2000; Floreano et al., 2008).

3 LA INGENIERÍA DE SISTEMAS COMPLEJOS

En marcado contraste con la ciencia clásica, hemos descubierto que hay fenómenos y sistemas que no se pueden predecir o controlar. Esta idea, sin embargo, no termina de ser asimilada y mucho menos incorporada en el trabajo diario de las ciencias sociales o de la ingeniería tradicional que tiene diversos nexos con las ciencias sociales en general.

Pues bien, dados los rasgos característicos de los sistemas, fenómenos y comportamientos complejos, Maldonado, C. E. (2003) ha planteado la posibilidad de trabajar, en el plano teórico y práctico, en términos de tres pilares, así: se trata de comprender la complejidad, actuar sobre la complejidad y aprovechar la complejidad (*harnessing complexity*). Estos tres ejes se explican a continuación, precisamente en la explicación de lo que es, lo que hace y lo que puede la ingeniería de sistemas complejos.

La clase de nuevos problemas, fenómenos, comportamientos y sistemas que no pueden ser tratados desde la ingeniería tradicional hace referencia, notablemente, a los sistemas que evolucionan, que son adaptativos, que contienen emergencias y que no se explican ya en términos de distribuciones normales –es decir, por las leyes de los grandes números o en función de la campana de Gauss, sino, por el contrario, gracias a leyes de potencia-. No sin razón, una de las maneras como se han caracterizado a los sistemas complejos es como sistemas complejos adaptativos (CAS, en inglés), un concepto incorporado por primera vez por M. Gell-Mann. En términos generales, la ingeniería de sistemas complejos (Complex Engineered Systems, CES) ha emergido como resultado de nuevas tecnologías (digamos, *en passant*, que no precisamente de las TICs, que ya de nuevas poco o nada tienen), tales como la internet, los satélites de posicionamiento estratégico o GPSs, las redes inalámbricas, las tecnologías de fibra óptica, los sistemas micro-electrónico mecánicos (MEMS, en inglés) y la nanotecnología (Bar-Yam, 2004; Bar-Yam et al., 2006; Braha et al., 2006, 2005).

Algunos de los sistemas más notables que exhiben propiedades de complejidad creciente, incertidumbre e impredecibilidad son las redes de mercado, de comunicaciones, de transporte, redes sociales, de sistemas económicos. Más recientemente, el marco y el tema mismo de trabajo es precisamente el de las redes complejas, una nueva ciencia integrante a su vez de las ciencias de la complejidad, desarrollada originariamente a partir de los trabajos de D. Watts, L. Barabási y S. Strogatz, entre los años 2001 y 2003.

Pues bien, lo propio de los sistemas caracterizados por complejidad *creciente* y que son, por consiguiente, adaptativos y/o evolutivos, es que no poseen un solo resultado. Por el contrario, se definen por el hecho de que tienen un espacio de resultados que presentan aspectos tales como la presencia de atractores –fijos, periódicos o extraños-, autosimilitud –y ocasionalmente fractales escalantes-, en fin, impredecibilidad y autoorganización. Sin embargo, con seguridad, el rasgo más relevante consiste en el hecho de que la ingeniería de sistemas complejos trabaja sobre sistemas que carecen de un control central y rígido y, por tanto, no respetan o no obedecen a una jerarquía rígida y centralizada.

Como ha sido señalado por numerosos autores, la ingeniería convencional es una práctica ingenieril de los impactos y efectos directos, (producto), mientras que la ingeniería de sistemas complejos tiende a ser indirecta, porque se fundamenta ampliamente en la simulación, más que en diseño y el modelamiento, de los que también hace uso pero no es su fin último (Bar-Yam, 2003, 2002; Klein et al., 2006, 2005, 2004).

Un aspecto importante consiste en el hecho de que, análogamente a la ingeniería convencional, que establece especificaciones y requerimientos sabiendo de antemano que su diseño no logrará la optimalidad de una única solución, en la ingeniería no convencional hablamos de un espacio de soluciones o también de soluciones que varían con el tiempo. La razón más determinante estriba en el reconocimiento de la inscripción del modelo o artefacto ingenieril en un sistema que es, por definición abierto y variable. De esta suerte, por primera vez, la ingeniería de sistemas complejos puede hacer contribuciones significativas a un pensamiento estratégico en el marco de la complejidad.

En efecto, la estrategia de la ingeniería de sistemas complejos se orienta hacia la construcción de sistemas que puedan desempeñarse en ambientes cambiantes, no tanto introduciendo variables y multicausalidad, cuanto que dando cabido a la sorpresa, a la impredecibilidad, a la movilidad y al cambio de jerarquías de sus variables o componentes. En este sentido, la ingeniería de sistemas complejos define la robustez de un sistema en función de controles locales y no de un control rígido, jerarquizado, definido de antemano. Exactamente en este sentido se dice que la ingeniería de sistemas complejos trabaja con sistemas vivos tanto como con sistemas que exhiben vida. Precisamente por ello el foco se sitúa en el trabajo con heurísticas y metaheurísticas, y se la conoce como ingeniería bio-inspirada (Talbi, 2009). Así, la vida artificial, la inteligencia de enjambre y la incorporación de lógicas no-clásicas constituye un valuarte sin igual. Atrás van quedando los tiempos en los que el interés estaba centrado en autómatas celulares, algoritmos genéticos y redes neuronales. La razón no es de simple modelamiento o simulación, sino, más auténtica y radicalmente, la diferencia es de *comprensión y explicación*. La ingeniería forma una unidad sólida con la ciencia, como nunca antes en la historia moderna.

En otras palabras, es fundamental el reconocimiento de que la estructura de un sistema complejo no resulta tanto de un proceso histórico de diseño como de un proceso evolutivo. La computación en general –“nueva computación” en realidad- se erige como columna vertebral de la nueva ingeniería, y entonces sus modos y realizaciones se conocen como computación inmunológica, computación evolutiva, computación genética, computación celular, por ejemplo (Dasgupta, Niño, 2009). Gracias a ello, los sistemas complejos son susceptibles de adaptarse a condiciones cambiantes. Como las redes de comunicaciones, la internet, y los demás ejemplos mencionados al inicio. De esta suerte,

algunos de los atributos más destacados de la ingeniería de sistemas complejos son: la escalabilidad, la flexibilidad, la evolución, la adaptabilidad, la resistencia, la solidez, la durabilidad, la fiabilidad, el automonitoreo, la autoreparación (Bar-Yam et al., 2006). La siguiente tabla sintetiza y contrasta la ingeniería tradicional y la ingeniería de sistemas complejos:

INGENIERÍA TRADICIONAL	INGENIERÍA DE SISTEMAS COMPLEJOS
Agente local	Agente global
Productos reproducibles	No hay dos organizaciones iguales
Productos diseñados para satisfacer necesidades preestablecidas	Organizaciones aumentan su complejidad como resultado de la evolución
Los límites de los productos están claramente preestablecidos y definidos	Fronteras difusas entre las organizaciones
Aspectos no deseados en el producto final son eliminados al final	Organización evalúa constantemente nuevas posibilidades que sean útiles y viables para la evolución
Los productos son integrados por agentes externos	Las organizaciones se autointegran y se reintegran
El desarrollo termina para cada una de las instancias de realización del producto	El desarrollo de una organización es inacabado, porque evolucionan con el transcurso del tiempo
El desarrollo termina cuando las posibilidades no deseadas son eliminadas. Igual ocurre con las fricciones internas (competencias por recursos) interpretaciones ambiguas de un mismo elemento	Las organizaciones dependen de la cooperación y de la competencia para estimular su evolución
Aplica ciencia y matemática en entornos que no son sorpresivos ni admiten sorpresas	Se centra en el modelamiento y la simulación: Vida artificial, Swarm Intelligence, etc.

Resumiendo: la ingeniería de sistemas complejos es ingeniería que mira a la biología y a la ecología y no ya única o principalmente a la física. Es más, si mira a la física, no es ya principalmente a la mecánica clásica, sino a la nueva física que incluye a la termodinámica del no-equilibrio, la criticalidad autoorganizada (SOC, en inglés) y los sistemas caracterizados por incertidumbre. Es ingeniería que incorpora no ya principalmente cálculo integral y diferencial, sino matemáticas cualitativas (Maldonado, 2008), y no ya únicamente matemáticas referidas a sistemas rígidos, estables y mecánicos. En fin, es ingeniería abierta a otras ciencias y disciplinas y no y simplemente ingeniería que aplica matemáticas y explora soluciones.

4 INGENIERÍA NO CONVENCIONAL Y REDES COMPLEJAS

Si fuera posible circunscribir con una palabra o con una dimensión el ámbito de la ingeniería de sistemas complejos, estas serían: redes – redes complejas.

Ahora bien, como queda dicho: la ciencia y la ingeniería que se ocupa de redes complejas no obedece ya, en absoluto, a las distribuciones normales. Se encuentran aquí limitaciones

notables para la estadística clásica e incluso para la teoría de probabilidades. Frente a la primacía de la campana de Gauss, que centra la atención en los comportamientos y distribuciones normales menospreciando los extremos de la campana, el descubrimiento de las leyes de potencia a partir de los trabajos pioneros de Zipf, pero desplegados con carácter universal a partir del estudio de los sistemas de criticalidad autoorganizada (*self-organized criticality*, SOC) por parte Per Bak.

Las redes complejas se caracterizan por el hecho de que sus dinámicas y estructura obedecen a interacciones no-lineales entre sus componentes, dando como resultado distintos niveles de organización y de abstracción. Esta idea merece una consideración puntual.

Cuando la ingeniería convencional habla de "sistema" o de "organización", los entiende en el marco, explícito o tácito, de la física clásica, para la cual una organización o un sistema son fenómenos cerrados, aislados, o bien que exhiben un solo tipo de estructura. Precisamente por ello la interfase entre administración e ingeniería, por ejemplo, ha transmitido la idea según la cual un sistema cualquiera puede y debe ser entendido y articulado en función de gramas tales como un organigrama, histograma, flujograma, cronograma, y demás. La idea de base en tales casos es la de que no es posible ni necesario que haya adaptabilidad, descentralización, emergencias y autoorganización, todos rasgos distintivos de complejidad. En consecuencia, todos esos modelos tradicionales como organigramas, histogramas, cronogramas y flujogramas son eminentemente lineales, reduccionistas y simplificadores. Las ciencias sociales en general, y ciencias y disciplinas como la administración, la economía, la política y la sociología, por ejemplo, deben poder abrirse a la ingeniería de sistemas complejos. Pues bien, la puerta más expedita de comunicación es el estudio de las redes complejas. Podemos decir que asistimos a una transición de la *engineering management* al *management of engineering*, en el que podemos vislumbrar nuevas opciones de convergencias entre la educación en *management* e ingeniería; si ello es así, el papel más destacado lo cumplen, de un lado, la ingeniería no convencional y de otro, las ciencias de la complejidad. En rigor, se trata de dos facetas de una misma y sola moneda cuyo vórtice es el estudio y explicación de los sistemas no-lineales.

El estudio de las redes complejas ha llegado a ser el marco teórico más reciente en el estudio de las ciencias de la complejidad, dentro del cual han venido a inscribirse, como momentos suyos, capítulos que otrora eran independientes, tales como el caos, los fractales, la teoría de catástrofes, la criticalidad autoorganizada (Barrat et al., 2008; Mitchell, 2009).

Las bases teóricas de la ciencia de redes complejas es doble: la teoría de grafos, y la topología (en particular la topología estructural), y la finalidad es la de encontrar y describir heterogeneidades topológicas. Los modelos considerados son, principalmente, los grafos aleatorios exponenciales, las redes evolutivas en el contexto de la termodinámica del no-equilibrio. Dos comportamientos particularmente conspicuos son la resiliencia de las redes y los fenómenos de sincronía. En fin, el foco se sitúa en la teoría de la percolación y en la emergencia de cascadas. Todo ello permite determinar con claridad la robustez y la flexibilidad de las redes. Lo demás es el cruce entre sistemas naturales, sistemas biológicos, sistemas sociales y sistemas artificiales.

5 INGENIERÍA Y EL MUNDO DE LA VIDA

De todas las áreas de la ciencia y la tecnología en general, la más alejada había sido la ingeniería; esto es, la ingeniería convencional. De acuerdo con la crítica, bien fundamentada, de Snow acerca de las dos culturas, la científica y la humanística y la crisis que implica para la civilización occidental en general, sin lugar a dudas las antípodas más fuertes se sitúan entre las humanidades en general y la ingeniería. A esta se la acusó de eminentemente operativa, lineal, fría, y otras consideraciones semejantes, no siempre sin razón.

Una consecuencia insospechada de la emergencia de la ingeniería de sistemas complejas es que, en marcado contraste con la ingeniería convencional, se erige en bastión activo en la reconciliación, por así decirlo, de las dos culturas. Dicho de manera franca: la ingeniería no convencional permite una recuperación del mundo de la vida, precisamente a partir del reconocimiento de la complejidad del mundo de la vida.

El concepto del mundo de la vida aparece formulado originariamente en res contextos diferentes, así: de un lado, en el contexto de la biología, constituye un pilar en el pensamiento de J. Von Uexküll, quien emplea el concepto de *Umwelt*, es decir, como el conjunto de factores ambientales que definen las relaciones de los seres vivos con los recursos externos. La *Umwelt* designa el nicho ecológico tal y como los animales lo perciben. De otra parte, al mismo tiempo, el concepto mismo de mundo de la vida es formulado por primera vez en la historia del pensamiento, gracias a la filosofía fenomenológica de E. Husserl quien la designa como *Lebenswelt*. Posteriormente, en tercera instancia, el concepto sería incorporado por el joven Habermas con una áurea fenomenológica pero con un vector social y ético. En cualquier caso, las contribuciones de Uexküll y de Habermas son esencialmente tangenciales y la verdadera contribución procede del marco de la fenomenología. En otras palabras, el mundo de la vida contiene una áurea fenomenológica y una actitud eminentemente filosófica.

El mundo de la vida es la instancia que cumple una doble función. De un lado, frente a la crisis de las ciencias europeas consiste en el alejamiento e incluso la indiferencia ante el mundo de la vida, esto es, ante la cotidianeidad. De otra parte, el mundo de la vida es el resultado del método fenomenológico consistente en la puesta entre paréntesis de todos los juicios y pre-juicios acerca del mundo, gracias a lo cual las ciencias en general pueden recuperar sentido, y que no es otra cosa que la afirmación, exaltación, posibilitamiento y gratificación de la vida misma en comunidad (Maldonado, C. E., 1995).

Europa está cansada (*Europa ist müde*), sostiene Husserl, y ese cansancio se origina en la Grecia antigua, pero se refuerza a partir de la Modernidad con la mecánica clásica. Por "Europa" en la visión de Husserl no hay que pensar simplemente una región geográfica –a saber, la península de Asia que se designa a sí misma como "Europa", y que abarca desde la península ibérica hasta Polonia o Grecia-, sino, mejor, a la humanidad occidental misma, aquella que es heredera de la Grecia antigua, y que acontece como el distanciamiento de pueblos, culturas y civilizaciones como Egipto, Siria, Fenicia y Mesopotamia, en fin, los Hititas los Sumerios.

Frente a la crisis de las ciencias (Paci, 1972), Husserl plantea poner entre paréntesis la validez misma de la ciencia, gracias a lo cual descubrimos o recuperamos el mundo de la vida, que permanecía oculta debido al sobredimensionamiento de la ciencia y la

tecnología. Heidegger radicalizará el diagnóstico acusando a la historia de Occidente del nihilismo y de confundir el ser con el ente, el ocultamiento de la verdad, la sobreacentuación de la técnica y – la tecnociencia. Como colofón de dicha crisis, por su parte G. Vattimo acusará el advenimiento de un pensamiento débil. El último estertor de esa historia sería la postmodernidad.

Pues bien, contra Habermas, que ha venido a erigirse como la imagen más popular de las consideraciones acerca del mundo de la vida, hay que decir que, propiamente hablando, el mundo de la vida no constituye un punto de partida, sino un *punto de llegada*. Notablemente, se trata del mundo que ganamos gracias a la época, es decir, la puesta entre paréntesis (*Einklammerung*) de todos los juicios, mediante la cual accedemos al mundo de la vida como origen de sentido.

Dicho en el lenguaje de los sistemas complejos no-lineales, el mundo de la vida no obedece a las distribuciones normales. En tanto que estas imperen y sean suficientes para explicar un plano determinado del mundo, allí no existe innovación, y ciertamente no innovación radical, en fin, investigación básica. El mundo de la vida, la naturaleza, la sociedad en fin funciona y se explica mucho mejor en términos de leyes de potencia; en realidad, de leyes de potencia y multiescalaridad, dos expresiones distintas para un mismo tipo de comportamientos, sistemas y fenómenos, a saber: aquellos que conciernen tanto a las ciencias de la complejidad como a la ingeniería no convencional.

La historia clásica fue la de la contraposición entre ciencia y tecnología y la vida, la cultura, la naturaleza (tres maneras distintas de designar un mismo conjunto de problemas). Pero dicha contraposición puede considerarse resuelta gracias a la transformación de la ingeniería convencional en ingeniería de sistemas complejos. La dificultad estriba en el hecho mismo de que, por primera vez, el manifiesto, si cabe la expresión, del nacimiento de la ingeniería de los sistemas complejos está fechado en el año 2006, y su padre es Y. Bar-Yam, y en general el trabajo que se adelanta en el New England Complex System Institute (NECSI). Como se aprecia, se trata de un fenómeno perfectamente reciente en la historia del conocimiento tanto como del trabajo sobre el mundo, la sociedad y la naturaleza que es la ingeniería.

Digámoslo de manera directa: el tema con el que nos encontramos a propósito de la superación de las dos culturas (Snow) es el de la armonía (Tiezzi, 2006). Debe ser posible, y es efectivamente posible una ingeniería de la armonía. Esta idea es a todas luces extraña, a la luz de la tradición de la ingeniería e incluso de la ciencia, y es ciertamente una idea que suena exótica, por decir lo menos cuando se la mira desde el trabajo *normal* de la ciencia y la ingeniería².

Una observación final, antes de terminar. En inglés la expresión es la de *complex engineered systems*, *CES*, cuya mejor traducción sería la de sistemas ingenierados de manera compleja. En español como en francés, en contraste, la expresión es la de ingeniería de sistemas complejos – o también, *ingénierie des systèmes complexes*. Existen grandes diferencias entre las dos expresiones.

² "Normal" tiene aquí la acepción que le confiere T. Kuhn en el contexto de la existencia y surgimiento de revoluciones científicas, en conflicto con la ciencia normal; cfr. Kuhn 1972).

De un lado, en inglés el verbo existe de manera natural: ingenierar, algo perfectamente imposible en español (o francés). Pero, de otra parte, y de manera más significativa, la expresión en inglés hace referencia a una manera de operar teórica y prácticamente de parte de la ingeniería. La transformación es radical, del lado del sujeto cognoscente y actuante; en este caso, el caso es la ingeniería – el ingeniero. En español o en francés, en contraste, se crea un grupo nuevo, o se delimita a la realidad, o se circunscribe una parte de la sociedad y de la naturaleza, por ejemplo; como se quiera. La nueva dimensión es la de los sistemas complejos, frente a la cual, la ingeniería se apartaría de lo que convencionalmente era y venía haciendo. El desdoblamiento de la realidad se acompaña como emergencia de un nuevo tipo de ingeniería. En inglés, por el contrario, es el mismo corpus teórico y práctico el que se transforma al pensar y actuar en correspondencia con la complejidad. En este contexto sería baladí recabar en la distinción del inglés entre técnica y tecnología, y la preferencia en francés por la técnica. En español tenemos una opción intermedia.

Pues bien, ¿a qué viene esta breve digresión semántica? La filosofía analítica lo ha puesto de manifiesto: hacemos cosas con palabras, tanto como destruimos y deshacemos cosas también con palabras. Cuando se hace ciencia, el primer objeto de trabajo no es el mundo, la realidad o la naturaleza. Por el contrario, el primer objeto de trabajo es el lenguaje con el que decimos el mundo, la sociedad o la naturaleza. Y tanto más cuando se trata de estudiar lo nuevo, de pensar lo nuevo y de hacerlo posible. Pues, todos lo sabemos, el lenguaje opera espontáneamente como un fijador en cine o en fotografía. Pensemos nuevos espacios, acciones y posibilidades: pero debemos pensarlos a través del lenguaje. Siempre, sin embargo, sin incurrir en errores frecuentes como en política y economía, por ejemplo, a saber: sin resolver los problemas reales con palabras, o los problemas reales en términos de problemas de palabras. No sin ellas, no contra ellas, los problemas reales del mundo suceden, en ocasiones, a pesar de las palabras. Ello hace referencia a la acción. Y la acción en ciencia se dice ingeniería. Aquí, ingeniería de sistemas complejos.

REFERENCES

- Barrat, A., M. Barthélemy, A. Vespignani, (2008). *Dynamical Processes on Complex Networks*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bar-Yam, Y., (2004). *Making Things Work*. Necsi Press.
- Bar-Yam, Y., (2005). "About Engineering Complex Systems: Multiscale Analysis and Evolutionary Engineering", en: *Engineering Self Organising Systems: Methodologies and Applications*, S. Brueckner, G. Di Marzo Serugendo, A. Karageorgos, R. Nagpal Eds., Berlin;; Springer Verlag, pp.16-31.
- Bar-Yam, Y., (2006). "Engineering Complex Systems: Multiscale Analysis and Evolutionary Engineering", en: *Complex Engineered Systems*, D. Braha, A. Minai, Y. Bar-Yam (Eds.).
- Bar-Yam, Y., (2003). "When Systems Engineering Fails --- Toward Complex Systems Engineering", en: *International Conference on Systems, Man & Cybernetics 2003 Vol. 2* (IEEE Press, Piscataway, NJ), pp. 2021- 2028.

- Bar-Yam, Y., (2002). "Large Scale Engineering and Evolutionary Change: Useful Concepts for Implementation of FORCEnet", Report to Chief of Naval Operations Strategic Studies Group, 2002
- Braha, D., A. Minai, Y. Bar-Yam (Eds.), (2006). *Complex Engineered Systems. Science Meets Technology*. Berlin: Springer Verlag.
- Braha, D., and Y. Bar-Yam, (2006). "The Structure and Dynamics of Complex Product Design", en: *Complex Engineered Systems*, D. Braha, A. Minai, Y. Bar-Yam (Eds.).
- Braha, D., Y. Bar-Yam, (2004). "Topology of large-scale engineering problem-solving networks", *Phys. Rev. E* 69, 016113-1-7.
- Braha, D., Y. Bar-Yam, (2004). "Information Flow Structure", en: *Large-Scale Product Development Organizational Networks, Smart Business Networks*, Peter Vervest et al. (Eds), Berlin: Springer Verlag
- Dasgupta, D., Niño, L. F., (2009). *Immunological Computation. Theory and Applications*. CRC Press
- Echeverría, J., (2003). *La revolución tecnocientífica*. Madrid: F.C.E.
- Floreano, D., and C. Mattiussi, (2008). *Bio-Inspired Artificial Intelligence. Theories, Methods, and Technologies*. Cambridge, MA/London: The MIT Press.
- Galison, P., and Hevly, B., (1992), (eds.). *Big Science: the Growth of Large-Scale Research*. Stanford: Stanford University Press.
- Klein, M., H. Sayama, P. Faratin, Y. Bar-Yam, (2006). "The Dynamics of Collaborative Design: Insights from Complex Systems and Negotiation Research", en: *Complex Engineered Systems*, D. Braha, A. Minai, Y. Bar-Yam (Eds.).
- Klein, M., H. Sayama, P. Faratin, Y. Bar-Yam, (2006). "Negotiation Algorithms for Collaborative Design Settings", en: *Complex Engineered Systems*, D. Braha, A. Minai, Y. Bar-Yam (Eds.).
- Klein, M., R. Metzler, Y. Bar-Yam, (2005). "Handling emergent resource use oscillations", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Part A: Systems and Humans, 35, pp. 327-336.
- Klein, M., H. Sayama, P. Faratin, Y. Bar-Yam, (2003). "The dynamics of collaborative design: Insights from complex systems and negotiation research", en: *Concurrent Engineering: Research and Applications* (CERA Journal).
- Klein, M., H. Sayama, P. Faratin, Y. Bar-Yam, (2003). "A complex systems perspective on how agents can support collaborative design", en: *Agent Supported Cooperative Work*, Y. Ye and E.F. Churchill, (Eds.), Berlin: Springer Verlag.
- Klein, M., H. Sayama, P. Faratin, Y. Bar-Yam, (2002). "A complex systems perspective on computer-supported collaborative design technology", *Communications of the ACM* 45 27-31.
- Klein, M., H. Sayama, P. Faratin, Y. Bar-Yam, (2001). "What complex systems research can teach us about collaborative design", en: *Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD-2001)* 5-12 (IEEE Press).

Kuhn, T., (1972). *Estructura de las revoluciones científicas*. México: F.C.E.

Kuras, M. L., Y. Bar-Yam, (2003). "Complex Systems and Evolutionary Engineering", an AOC WS LSI Concept Paper, September.

Maldonado, C. E., (1995). *La idea del mundo en la fenomenología de E. Husserl*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Maldonado, C. E., (2003). "Marco teórico del trabajo en ciencias de la complejidad y siete tesis sobre la complejidad", en: *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, Vol. IV, Nos. 8 y 9, 139-154

Maldonado, C. E., (2008). "Complejidad y ciencias sociales desde el aporte de las matemáticas cualitativas", en: *Cinta Moebio* 33: 153-170: www.moebio.uchile.cl/33/maldonado.html.

Minai, A., D. Braha, Y. Bar-Yam (Eds.), (2006). "Complex Engineered Systems: A New Paradigm", en: *Complex Engineered Systems*, D. Braha, A. Minai, Y. Bar-Yam (Eds.).

Mitchell, S., (2009). *Complexity. A Guided Tour*. Oxford: Oxford University Press.

Paci, E., (1972). *The Function of the Sciences and the Meaning of Man*. Evanston: Northwestern University Press.

Talbi, E-G., (2009). *Metaheuristics. From Design to Implementation*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Tiezzi, E., (2006). *La belleza y la ciencia. Hacia una visión integradora de la naturaleza*. Barcelona: Icaria.

Vogel, S., (2000). *Ancas y palancas. Mecánica natural y mecánica humana*. Barcelona: Tusquets

Werfel, J., Y. Bar-Yam, D. Ingber, (2008). "Bioinspired environmental coordination in spatial computing systems". Workshop on Spatial Computing, at Second IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO 2008), Venice, Italy.

Werfel, J., Y. Bar-Yam, D. Rus, R. Nagpal, (2006). "Distributed construction by mobile robots with enhanced building blocks", en: *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006)*, Orlando, Florida.

Werfel, J., Y. Bar-Yam, R. Nagpal. (2005). "Building patterned structures with robot swarms", en: *Proceedings of the Nineteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2005)*, Scotland, UK, 1495-1502.

Werfel, J., Y. Bar-Yam, R. Nagpal, (2005). "Construction by robot swarms using extended stigmergy". AI Memo AIM-2005-011, MIT Computer Science and Artificial Intelligence Lab.

Sitios web: <http://www.necsi.edu/research/engineering>.