

AZAR Y ORDEN

Roberto P. J. Perazzo

Académico Titular, Academia Nacional de Ciencias Exactas Físicas y Naturales

Resumen

En este trabajo discutimos la interrelación entre el azar y el orden y cómo el primero puede inducir al segundo. Presentamos varios ejemplos extraídos de investigaciones anteriores que involucran modelos teóricos de la evolución biológica, algunos modelos computacionales de múltiples agentes o de teoría de juegos para la organización social, una línea de transmisión basada en el fenómeno de resonancia estocástica y un ejemplo de computación cuántica. En todos estos ejemplos una adecuada presencia de azar sirve para hacer que los sistemas biológicos, sociales o físicos muestren patrones ordenados de comportamiento o encuentren configuraciones internas que son óptimas.

Palabras clave: Aleatoriedad, Dinámica estocástica, Algoritmos genéticos, Juego de la minoría, Modelo de "concurencia al bar".

Abstract

Randomness and order. In this paper we discuss the interplay between randomness and order. We present several examples that are drawn from a series of previous investigations involving theoretical models of evolutionary biology, some computer multi-agents and game theoretical approaches to social organization, a transmission line based upon the phenomenon of stochastic resonance and quantum computation. In all these examples some amount of randomness is necessary to drive biological, social, or physical systems into ordered patterns of behaviour or to find optimal internal configurations.

Key words: Randomness, Stochastic dynamics, Genetic algorithms, Quantum computation, Minority game, "Bar attendance" model.

1. Introducción

En nuestro lenguaje cotidiano azar y orden son conceptos antitéticos. Mientras que el primero nos induce dudas y ansiedad, el segundo evoca seguridad y certidumbre. El propósito de esta comunicación es mostrar que ambos conceptos distan de ser opuestos y, hasta cierto punto, puede pensarse que entre ambos existe cierta complementación.

La incertidumbre incomoda y el riesgo atemoriza. Es quizá por eso que desde el comienzo de los tiempos lo inevitable fascinó a la humanidad. No es aventurado pensar que esa aversión ancestral por lo imprevisible originó, a un tiempo, a la magia, la ciencia y la religión. Ellas, cada una a su modo, ilustran al hombre sobre futuros

inciertos y lo ponen a salvo de porvenires riesgosos. Así es que la relación del hombre con la incertidumbre está presente en la raíz de las creaciones más trascendentes del espíritu humano y define, en buena medida, nuestra relación con el mundo que nos rodea.

La defensa de los mortales ante el azar es la Divina Providencia. Se manifiesta por una parte en la creencia de una divinidad que es responsable del universo en general y del hombre en particular, y por la otra en la certidumbre de un orden cósmico en que el bienestar del hombre tiene un papel preponderante. En ese concierto no se admiten trasgresiones y es por ello que la inserción armoniosa del hombre en el mismo genera reglas de conducta y de organización social. La

armonía cósmica contrasta con las ideas de caos, desorden y azar. Ese orden no sólo afecta a los astros sino que comprende a toda la naturaleza y, por extensión, a las normas sociales y éticas que rigen la relación entre los seres humanos.

El azar se ha vinculado con la voluntad inescrutable de los dioses debido a que los hechos parecen aleatorios debido a nuestra ignorancia. Esta es la base de lo que se puede denominar "azar subjetivo". Para un ser omnisciente la naturaleza luciría por el contrario totalmente predecible. En esta idea es que se inscribe la afirmación de Laplace:

"Una inteligencia que en un momento determinado conociera todas las fuerzas que animan a la naturaleza, así como la situación respectiva de los seres que la componen, si además fuera lo suficientemente amplia como para someter a análisis tales datos, podría abarcar en una sola fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y los del átomo más ligero; nada le resultaría incierto y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante sus ojos" [1].

Con el correr del tiempo se descubrieron en cambio fenómenos naturales que son irreductiblemente aleatorios. Es lo que se puede denominar un "azar objetivo". El primer paso en esta dirección fue quizá dado por la biología con la teoría de la evolución de Darwin. En ella los cambios impredecibles y aleatorios son los arquitectos que diseñan las especies. Más adelante el papel del azar se tornó inevitable cuando se comenzó a tener una visión del mundo desde la perspectiva del microcosmos. En la física y la química el azar irrumpió con la gran síntesis de la mecánica y la termodinámica impulsada por Boltzmann. Poco más tarde la mecánica cuántica completó esta visión: la desintegración de un núcleo radiactivo o la posición y las velocidades de las partes constitutivas de un átomo sólo admiten una descripción probabilística. La actual perspectiva molecular de la reproducción de los seres vivos hace que ésta no pueda entenderse como un proceso mecánico y previsible tal como podría haber sido la idea de Laplace.

La convivencia del azar y el orden es antigua. Antes que se tuviera conocimiento de esos fenómenos naturales, Descartes consideró que el azar objetivo nos habilita como seres libres. Su argumento: una máquina está gobernada por un previsible y rígido orden interno de funcionamiento y es por consiguiente incapaz de ejercer, en cada momento, la libertad de elección que es propia de los seres humanos. Se puede pensar que esa es la primera vez que se concibió una coexistencia armónica de azar y orden.

La visión actual de una máquina difiere radicalmente de la que podría haber tenido Descartes o, aun, cualquier exponente de la ciencia o la técnica del siglo XIX. Es quizá por ello que hoy esa coexistencia es moneda corriente en muchas áreas del conocimiento. El azar y la incertidumbre han pasado a formar parte de nuestra comprensión de la naturaleza y es difícil imaginar la ciencia contemporánea sin que lo aleatorio tenga un papel preponderante. En las secciones que siguen repasaré algunos ejemplos en los que me ha tocado vivir directamente la fascinante experiencia de ver cómo el orden y el azar conviven armoniosamente y se realimentan de manera positiva y estimulante.

2. Modelos computacionales de la evolución darwiniana

A mediados del siglo XIX la evolución darwiniana constituyó el primer ejemplo de una relación constructiva entre azar y orden, ya que contenía la posibilidad que un proceso enteramente gobernado por el azar puede conducir a organismos con un alto grado de orden y complejidad. El rechazo a esas teorías, que perdura un siglo y medio más tarde, da una medida del disgusto que produce el papel constructivo que juega el azar en esta concepción.

La moderna biología molecular enseña que la arquitectura y la organización de los seres vivos más complejos está contenida en su información genética. Ésta contiene las instrucciones necesarias para sintetizar las proteínas necesarias para la vida. Se puede pues interpretar a los procesos vitales como el resultado de la ejecución de un programa almacenado en su genoma y con las instrucciones necesarias para que una computadora química sintetice los ladrillos fundamentales de la vida.

Son los genes los que determinan los caracteres de los seres vivos. Los individuos más aptos tienen una descendencia más copiosa, con lo que se consigue que los caracteres distintivos de esa aptitud se difundan más en las generaciones siguientes. Así como la información genética heredada se puede entender como un programa, el proceso evolutivo se puede interpretar como un cambio gradual y progresivo de ese programa a lo largo de generaciones para dar lugar a individuos mejor adaptados al medio en que se encuentran.

Este modo de pensar induce a replicar artificialmente el camino que condujo a sutilezas de extrema funcionalidad en la adaptación de los sistemas biológicos al medio en que viven. Con esta línea de razonamiento se implementaron hace ya más de una década los llamados "algoritmos genéticos" [2] [3] para la búsqueda de extremos de funciones, objetivo de alta complejidad. Con esta herramienta se han desarrollado solu-

ciones de problemas en ciencia e ingeniería de la más variada naturaleza.

Estos algoritmos imitan dentro de una computadora el proceso de selección que se da en la naturaleza: se crea en la memoria una población de individuos, cada uno de los cuales representa una secuencia de instrucciones capaz de calcular la función cuyo extremo se desea obtener. A partir de ese momento se generan sucesivas generaciones en las que los individuos de esa población "mutan" y se "recombinan" alterando de ese modo las secuencias de instrucciones. Cada generación enfrenta asimismo un proceso de selección, que no es otra cosa que el descarte sistemático de aquellas combinaciones que producen los extremos menos satisfactorios.

En la implementación de estos algoritmos el azar juega un papel tan trascendente como en la naturaleza. Se suele visualizar a la función objetivo como un paisaje rugoso en un elevado número de dimensiones. El azar es el mecanismo mediante el cual se explora esa superficie en búsqueda de sus picos más elevados o sus valles más profundos y lo hace introduciendo diversidad: cambios locales y azarosos aparecen como nuevos individuos en la población de programas, representando nuevas alternativas para la búsqueda del extremo. Su aparición azarosa contando con una mayor aptitud evita la "dictadura de los mediocres": individuos que por ser apenas algo más aptos terminan dominando a toda la población por proliferar en demasía. Este azar debe aparecer, sin embargo, en el nivel apropiado. Si el aporte de diversidad es excesivo ninguna variante exitosa puede ser retenida por la población, y si esa tasa es demasiado baja la población no se adapta.

Esta herramienta computacional puede utilizarse para desarrollar modelos numéricos que permiten dilucidar conjeturas propias de la biología evolutiva. Un tema que hemos estudiado [4] [5] [6] es la interacción del aprendizaje y el proceso evolutivo. Si bien ambos son procesos de adaptación una es ontogenética y tiene lugar en lapsos compatibles con la vida de los individuos, mientras que la otra se manifiesta a lo largo de generaciones.

La primera propuesta para esta interacción fue bajo las influencias del Lamarckismo que, preconizando la heredabilidad de caracteres adquiridos suponía que lo que tempranas generaciones incorporaban por vía de su adaptación al medio, terminaba por incorporarse a las características propias del fenotipo.

Hacia fines del siglo XIX Baldwin propuso un mecanismo puramente darwiniano para el proceso de transcripción de características del medio a la información genética. Su argumento puede resumirse en los términos siguientes. La plasticidad

que hace posible la adaptación (aprendizaje) de ciertos individuos a una dada característica del medio hace mucho más probable que generaciones posteriores incorporen en su información genética la propiedad que anteriores generaciones adquirieron (aprendieron) gracias a su plasticidad. Este proceso que se dio en llamar "Efecto Baldwin" puede ser la explicación del origen, entre otras cosas, de los ciclos circadianos, de ciertos comportamientos instintivos y, en el ser humano, de la existencia de categorías semánticas innatas.

El proceso evolutivo de acumulación de mutaciones favorables en la información genética debe ser mediado por el fenotipo. Sus características de plasticidad y adaptabilidad son determinantes en el proceso de transcripción de la información del medio. El modelo computacional desarrollado en [4] y [5] se dedicó a estudiar precisamente esta influencia, concluyendo que una gran flexibilidad en la capacidad de aprendizaje producía un resultado precisamente opuesto al "efecto Baldwin" estancando –y no facilitando– el proceso de transcripción de la información del medio al genotipo.

El efecto Baldwin se manifiesta con propiedades del medio que se mantienen casi inalteradas a lo largo del proceso evolutivo: los ciclos circadianos, por ejemplo, se ajustan a la duración del día que ha permanecido inalterado a lo largo de tiempos geológicos. En un medio ambiente cambiante los seres vivos de una cierta complejidad enfrentan, por el contrario, desafíos impredecibles; lo que pueda resultar útil a una generación puede ser inútil para la siguiente. Frank [7] sugirió que la respuesta evolutiva a esta circunstancia es el desarrollo de subsistemas flexibles capaces de adaptarse ontogenéticamente.

Un ejemplo es el sistema inmunitario. Gracias a él cada generación desarrolla sus propias defensas contra un entorno bioquímico hostil que pueda cambiar su naturaleza de modo apreciable en el lapso que media entre sucesivas generaciones. La estabilización de sinapsis a través del proceso hebbiano en el sistema nervioso central de los vertebrados superiores es otro ejemplo ya que hace posible la memoria y el aprendizaje permitiendo a cada generación reconocer situaciones de riesgo o repetir conductas exitosas diferentes a las de sus progenitores. Aun una estructura social posee subsistemas flexibles compuestos por los sectores encargados de la educación de sus nuevos integrantes. Estas unidades aseguran la subsistencia de toda la sociedad frente a adversidades impredecibles.

El modelo computacional que desarrollamos en [6] fue hecho para comprender bajo qué circunstancias emergen subsistemas flexi-

bles. En dicho modelo permitimos que una seudoespecie evolucione en presencia de un medio ambiente capaz de cambiar adoptando una de sólo dos características posibles. Nos preguntamos sobre las condiciones bajo las cuales dicha seudoespecie termina por codificar en su información genética la posibilidad de adaptarse a los cambios del medio. El parámetro de control del modelo es la frecuencia del cambio del medio.

En la Fig. 1 se representan los "paisajes" de aptitud o "fitness" de la seudoespecie para distintos valores de la frecuencia de cambio del medio. El proceso evolutivo puede visualizarse como la búsqueda de los picos más elevados de ese paisaje. Cuando más baja es la tasa de cambio del medio los costos de aprendizaje son menores y los picos más elevados son los que corresponden a un "óptimo flexible" en que su información genética codifica la flexibilidad necesaria para adaptarse a los cambios del medio. Cuando la tasa de cambio del medio es elevada, el aprendizaje es demasiado costoso y los individuos de esta seudoespecie deben renunciar a acompañar los cambios del medio en que se encuentran y optan en cambio por un "óptimo fijo" en el que sólo está codificada la información de una de las posibles alternativas del medio.

Curiosamente, el proceso evolutivo de búsqueda de este óptimo puede encuadrarse en el efecto Baldwin que mencionamos arriba ya que la seudoespecie termina por codificar en su información genética la naturaleza cambiante del medio.

La diferencia importante es que este efecto sólo ocurre si la tasa de cambio del medio es la apropiada.

Es interesante observar que precisamente la respuesta evolutiva a los cambios impredecibles del medio es la que nos ha conferido la capacidad de recordar y aprender y, con ellas, la de lograr un complejo nivel de organización interna.

3. Autoorganización en sociedades artificiales

Las mismas ideas que permiten simular en una computadora un proceso evolutivo pueden utilizarse para construir organismos artificiales ("agentes") capaces de recibir y procesar información del medio en que se encuentran, constituido, entre otros elementos, por otros agentes del mismo tipo. Esto permite recorrer un largo camino hacia el estudio "in silico" de sociedades artificiales. También en estos casos, el azar puede inducir la organización o el ordenamiento "espontáneo" de estas sociedades de juguete. Esta temática ha sido encuadrada bajo el rótulo de Inteligencia Artificial Distribuida.

Los sistemas económicos o sociales ofrecen ejemplos reiterados de acciones concertadas por un colectivo de agentes de muy diversa naturaleza. Una tal concertación es manifiesta aun cuando no exista un planificador central, los agentes posean información insuficiente o no puedan comunicarse sino de manera muy rudimentaria. Los mecanismos que subyacen a este ordenamiento

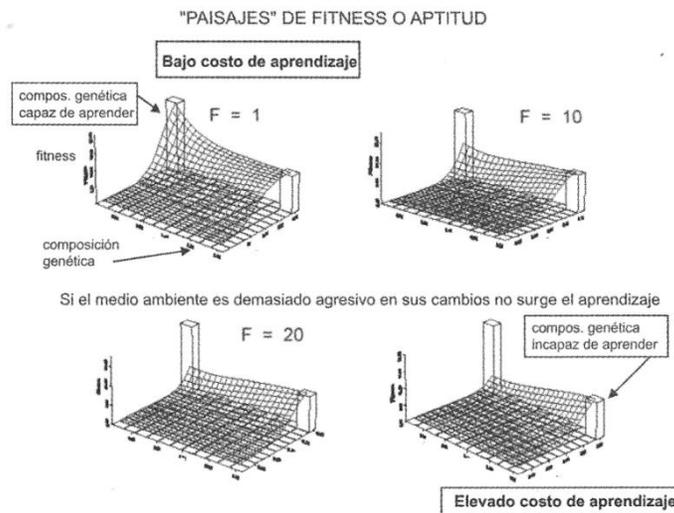


Figura 1

to es un problema que puede abordarse de manera fecunda con sociedades artificiales como las mencionadas. Con estas herramientas estudiamos [8] un sencillo problema de coordinación que fue inicialmente propuesto por Brian Arthur [9]. Suponemos que N agentes desean concurrir a un local pero deben hacerlo de modo que la fracción de agentes presentes no supere ni caiga debajo de valores acordados de antemano. La coordinación debe alcanzarse sin que cada agente sepa los planes de los restantes.

Para resolver este problema, dotamos a cada parroquiano de una población de "planes de concurrencia" y permitimos que la misma evolucione darwinianamente eliminando planes en los que encuentra una concurrencia inaceptable y validando aquellos que le aseguran una concurrencia adecuada.

En la Figura 2 se muestran dos ejemplos de la evolución de la concurrencia del local a lo largo de este proceso de aprendizaje colectivo y descentralizado. Ambos paneles difieren solamente en las condiciones iniciales que, en ambos casos son determinadas al azar. El ordenamiento que alcanza el conjunto de agentes ha sido dictado por las enseñanzas que les dejan fortuitas coincidencias cotidianas. A pesar que el proceso de adaptación está dictado por el azar, siempre se alcanza una ajustada coordinación entre los planes de concurrencia de distintos agentes. Este es un ensamble delicado que constituye una verdadera ecología de planes muy diversos, ya que es obvio que nunca todos pueden asumir la misma conducta.

En todos los casos no solamente se llegó a una coordinación aceptable sino que ésta es una solución Pareto óptima y representan un equilibrio de Nash. En el panel inferior, una fortuita coincidencia ha forzado a todos los parroquianos a descartar un día particular por haber encontrado repetidamente una concurrencia demasiado

escasa. Mientras que en el panel superior se alcanzó una concurrencia óptima, en el segundo ejemplo el sistema ha quedado atrapado en un mínimo secundario y metastable. El conjunto de agentes pueden sólo escapar de esta situación por el improbable cambio simultáneo de planes de una importante fracción de agentes. El tránsito de vehículos en las avenidas de la ciudad es un ejemplo de una situación muy semejante a ésta de nuestra vida cotidiana. Si por el contrario, al proceso de adaptación que siguen los agentes se le agrega la posibilidad de un fortuito intercambio de información con sus vecinos el resultado es sorprendente. Nunca el sistema cae en estos estados subóptimos y alcanza invariablemente su mejor y más perfecta coordinación de estrategias.

Estudiamos también [10] cómo un caso muy particular de este problema de coordinación podía ser encuadrado en un problema que recibió también una gran atención en la literatura bajo el nombre de "juego de la minoría" [11]. En este juego un número impar de agentes deben apostar, en cada momento, por una de dos alternativas que se codifican como 0 y 1, por otra parte enteramente equivalente al "concurrir" o "no concurrir" del ejemplo anterior. Cada agente gana puntos si su decisión coincide con la de la minoría. Siendo impar el número de jugadores, es claro que este juego sólo depara decepciones ya que si todos buscan ser la minoría, ésta deja de ser tal. Supusimos que el proceso de aprendizaje de los agentes está enteramente gobernado por el azar: cada jugador altera gradualmente la probabilidad p con que apuesta, digamos, por 0, y altera gradualmente esa probabilidad dependiendo de los puntos acumulados hasta el momento.

En la Figura 3 se muestra el ejemplo de cómo se organiza un conjunto de 101 agentes. En el panel de la izquierda se muestra, en cada mo-

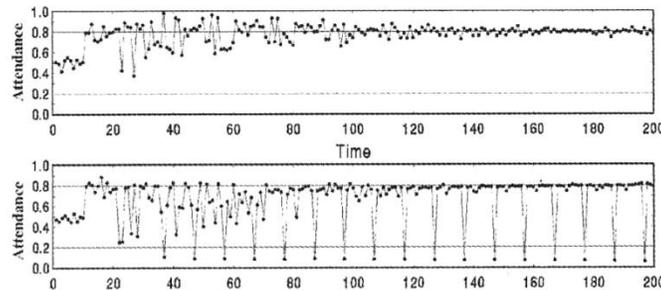


Figura 2

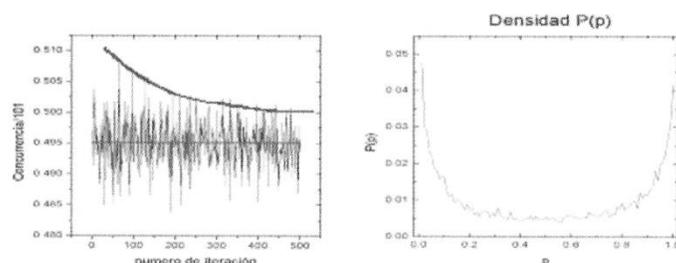


Figura 3

mento, la fracción de agentes que han apostado por una de las dos alternativas. Aun cuando esta fracción presenta un comportamiento errático, su dispersión (indicada por la curva regular superior) disminuye monótonamente desde el momento en que se inicia el juego, con lo que es legítimo decir que el conjunto de agentes se va ordenando progresivamente. Este orden se muestra en el panel de la derecha en el que se grafica la densidad de probabilidad con la que cada agente hace sus apuestas luego de numerosas rondas del juego. Los máximos en $p = 0$ y $p = 1$ indican que la población de agentes se segrega, aproximadamente en dos fracciones: los que deciden apostar por 0 y por 1.

Estos sistemas de múltiples agentes admiten ser analizados desde una perspectiva tanto numérica como termodinámica [13]. Entre otros resultados, de estos análisis surge que el equilibrio que se muestra en la Figura 3 es dinámico, ya que bajo la regularidad y constancia de la curva de la derecha queda disimulado el hecho que, continuamente, toda la población redefine sin cesar la probabilidad con que realiza sus apuestas pero, lo curioso, es que siempre se mantienen dos bandos bien diferenciados. Si por caso se hace la experiencia de seguir a un jugador determinado se observará que éste pasa por toda la gama de posibilidades que van desde apostar siempre por 0, a hacerlo siempre por 1 ganando y dilapidando puntos en el camino.

Este es otro ejemplo de un patrón regular y estable que emerge de un proceso de adaptación gobernado por el azar. Este patrón no es solamente temporal sino que puede extenderse también al espacio [14], [15] si es que la minoría o la mayoría se computan sobre una topología de entornos asociados a cada agente.

4. Orden y ruido en sistemas físicos

En los ejemplos anteriores el orden emerge del ruido y el azar por un proceso de se-

lección. En la evolución darwiniana de seudoespecies el agente ordenador está encarnado en la proliferación diferencial de individuos por su nivel de adaptación al medio. En el caso de sociedades artificiales la selección opera en el proceso de aprendizaje que realiza cada individuo de lo que hacen el conjunto de los restantes agentes. En todos estos casos se supone que los individuos poseen alguna plasticidad interna y que son capaces de cambiar su estructura interna –sea ésta su información genética o sus conductas– como resultado de su interacción con el medio ambiente.

En esta sección mostramos que orden y azar pueden alimentarse positivamente aun en ausencia de plasticidad, aprendizaje o selección. Para ello recurrimos al ejemplo de ordenamiento en un sistema físico que se sintetiza en los siguientes elementos: un sistema biestable sobreamortiguado, sometido a una débil excitación periódica externa e inmerso en un baño térmico. Estos elementos bastan para dar lugar al fenómeno conocido como "Resonancia Estocástica" [16] por la que la respuesta del sistema consiste en la amplificación de la excitación periódica externa siempre que el ruido externo tenga una amplitud comprendida en una ventana apropiada. Bajo estas circunstancias el sistema físico produce una respuesta coherente y ordenada concentrando en un único modo la potencia dispersa en todo el espectro del ruido externo.

Este ejemplo físico retiene características de los dos ejemplos anteriores. Si en este caso el ruido térmico externo excede un umbral aceptable, la respuesta del sistema es desordenada y la excitación periódica no puede ya más ser detectada. Esto es paralelo a lo que sucede en los procesos evolutivos: las mutaciones son equivalentes a una señal ruidosa que aporta diversidad al sistema. Sin embargo, si ese nivel de ruido excede un umbral aceptable no es posible retener ninguna alternativa exitosa y la población pierde el rumbo que fija el proceso de selección.

El fenómeno de resonancia estocástica se sabe hoy en día que está en la base de algunos procesos de percepción tanto en el ser humano como en los animales. Algunos peces son capaces de detectar una débil señal periódica producida por la natación de una presa gracias a que ella es amplificada por el ruido que proviene del movimiento desordenado del agua que lo rodea. Este fenómeno también fue utilizado para representar el funcionamiento de neuronas consideradas como dispositivos capaces de encontrarse en uno de dos estados posibles: en reposo o con su membrana polarizada y transmitiendo un tren de pulsos del potencial de acción a largo de su axón.

Utilizando esta idea nos propusimos [17] [18] estudiar la propagación de una señal a lo largo de una cadena de neuronas representadas esquemáticamente como dispositivos biestables, suponiendo que se inyecta una señal periódica débil al primer eslabón de esta cadena mientras que todos ellos se suponen afectados por el ruido externo. Los sucesivos eslabones de la cadena están acoplados por una interacción cuya intensidad es ϵ' .

El resultado está resumido en la Figura 4 en la que se representa la relación señal-ruido de los sucesivos dispositivos biestables de la cadena. Las diversas curvas están asociadas a una creciente intensidad en el acoplamiento ϵ' . Se ha supuesto que todos los eslabones están alimentados por el ruido externo salvo el décimo. Se puede observar que la señal inyectada en el primer eslabón se propaga a lo largo de la cadena y, además, dicha transmisión está sostenida y estimulada por el ruido externo ya que si este se suprime la señal deja de transmitirse, tal como se indica en la curva inferior. Si por el contrario el acoplamiento se incrementa la cadena pasa a un régimen en el que la transmisión es tolerante a fallos: más allá de un umbral mínimo en esa inten-

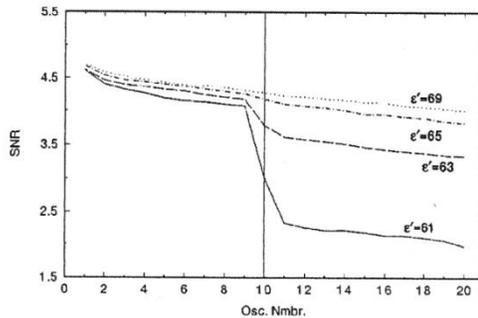


Figura 4

sidad ésta puede ignorar ocasionales eslabones "muertos".

El fenómeno de la resonancia estocástica puede también relacionarse con los motores brownianos, máquinas capaces de extraer trabajo de las fluctuaciones térmicas en aparente violación con el segundo principio de la termodinámica. Se trata en realidad de sistemas fuera del equilibrio, representados por partículas en presencia de un potencial periódico cuya simetría de reflexión está quebrada y cuyo comportamiento puede regularse aprovechando las fluctuaciones térmicas. Estudiamos [18] la conexión de los motores brownianos y la resonancia estocástica estimulando un sistema de esta naturaleza mediante una débil fuerza periódica externa, periódica tanto en el espacio como en el tiempo. Detectamos de este modo la presencia de dos efectos resonantes asociados respectivamente a dos "ventanas" diferentes para la temperatura externa. Uno de ellos puede asociarse a una difusión coherente de partículas sin que prevalezca ninguna dirección privilegiada. El segundo, en cambio, corresponde a un transporte ordenado de partículas en el que ellas saltan sincrónicamente de un mínimo del potencial periódico al siguiente. En estas condiciones el coeficiente de difusión muestra un incremento resonante.

Los motores brownianos son mecanismos que hacen al íntimo funcionamiento de los seres vivos ya que son el modo mediante el cual ciertas moléculas son transportadas de una parte a otra de las células vivas. La resonancia estocástica y los motores brownianos son dos ejemplos que nos provee la física en los que el azar puede dar lugar al orden y que son importantes en procesos esenciales para la vida.

5. Incertidumbre y computación.

Hasta este punto hemos hablado de sistemas físicos, biológicos y hasta sociales cuyo funcionamiento se simula mediante una computadora. En todos estos casos vimos que el agregado de elementos azarosos da lugar a manifestaciones con algún grado de orden interno. En esta sección daremos un último ejemplo. En él lo azaroso no proviene de fuentes externas como es la agitación por contacto con un baño térmico o por la presencia de mutaciones impredecibles, sino que proviene de la propia naturaleza microscópica del sistema que obliga a tratarlo con las reglas de la mecánica cuántica. Esta ha sido quizá la irrupción más llamativa del azar en la ciencia moderna ya que lo incierto aparece en la raíz misma de nuestra comprensión del mundo físico.

Una parte esencial en los ejemplos que anteceden es el correlato que puede efectuarse

entre los fenómenos que se estudian y su simulación mediante una computadora. El correlato que puede trazarse entre la computación y los fenómenos naturales nos debe llevar a considerar que, en realidad, que lo primero no es sino un caso muy especial de lo segundo. Las computadoras son sistemas físicos y la computación no es sino un proceso que debe obedecer a las leyes de la física. La computación no es ya más algo propio y exclusivo de la matemática sino que puede, y hasta debe, ser visualizado como un elemento del mundo físico.

Tradicionalmente se aborda la teoría de la computabilidad postulando la existencia de máquinas de Turing que son usualmente consideradas como sistemas físicos que obedecen las reglas de la electrodinámica clásica. Si se considera ese problema desde la perspectiva de la física surge inmediatamente la cuestión de cómo esta teoría debe modificarse [20], [21] si los sistemas físicos que llevan a cabo la computación deben ser descritos mediante las reglas de la mecánica cuántica. En particular, y en lo que se refiere al tema de este trabajo, cómo es posible la convivencia del proceso de la computación con la incertidumbre propia de la naturaleza del microcosmos.

Según las reglas de la mecánica cuántica un sistema físico se describe por una función de onda que depende de las variables dinámicas del sistema y cuyo cuadrado da la densidad de probabilidad con que se distribuyen los resultados de las mediciones que se efectúen sobre el sistema. Esta función está rotulada por las constantes de movimiento que son también observables del sistema y su evolución está gobernada por su hamiltoniano.

La información sobre la que opera una computadora cuántica debe codificarse mediante la yuxtaposición de sistemas cuánticos que tengan dos autoestados posibles que reciben el nombre de qubits. Construir una computadora cuántica consiste entonces en diseñar un hamiltoniano que opere sobre un conjunto de qubits y sea capaz de llevarlos de un estado inicial que contiene los datos del cálculo, a otro final sobre el que el resultado del mismo se obtiene mediante mediciones apropiadas. Una computadora cuántica debe pues ser descrita por un operador de evolución unitario que conecte los estados inicial y final; los cálculos, por consiguiente deben sólo involucrar operaciones lógicas reversibles.

Visualizar los procesos de computación desde la perspectiva de la física microscópica permite representar el estado inicial por una superposición de estados sobre los que actúa de manera simultánea por la propia naturaleza unitaria del operador que representa la computación cuántica. Este paralelismo intrínseco surge de la

naturaleza cuántica del sistema y, en último análisis, de la incertidumbre inherente a la mecánica a la que obedece.

Este enfoque permite, al menos teóricamente, encarar en tiempo polinómico problemas que son exponencialmente complejos. Si bien esto no ha sido aún demostrado con toda generalidad, existen algunos problemas, tal como la descomposición de un número en sus factores primos [22], para los que han sido desarrollados algoritmos adecuados. Aprovechando este enfoque volcamos [23] este algoritmo a una computadora cuántica. Ampliamos este estudio con todo para considerar una situación que puede darse en una eventual implementación de laboratorio. En estos casos puede suceder que alguno de los qubits decaiga espontáneamente haciendo que pierdan coherencia cualquiera de los estados intermedios por los que pasa la información a medida que progresa la computación y se hace necesario utilizar técnicas de corrección de errores.

La computación cuántica ha abierto un campo de especulación de una enorme fecundidad. En su forma más especulativa se ha considerado [24] que puede proveer las razones por la que no es aplicable la hipótesis de inteligencia artificial fuerte por la que toda manifestación de inteligencia humana es reducible a una máquina de Turing. Según esta idea, el funcionamiento de nuestro cerebro puede contener algunos rasgos que sólo son atribuibles a la existencia de procesamientos cuánticos que tienen lugar a nivel mucho más elemental que el de las células nerviosas. Si bien esto dista mucho de ser una conjetura fácilmente comprobable no deja de ser fascinante la sola idea que las incertidumbres del microcosmos puedan ser en parte responsables de nuestra capacidad de crear conceptos nuevos.

6. Conclusiones

La Compañía con modestia divina, elude toda publicidad. Sus agentes, como es natural, son secretos; las órdenes que imparten continuamente (quizá incesantemente) no difieren de las que prodigan los impostores.

....

Ese funcionamiento silencioso, comparable al de Dios, provoca toda suerte de conjeturas.

"La lotería en Babilonia" Jorge Luis Borges

Borges ha tocado el tema del azar en su cuento "La lotería en Babilonia". En él indaga sobre la presencia del azar en la vida de una sociedad conjetural. Esa búsqueda dista de ser una empresa banal, pronto es perceptible que apunta a la relación de los seres humanos con el mundo natural y su mundo espiritual. El progreso de

nuestro conocimiento científico ha seguido un camino semejante a la crónica que vuelca Borges en su cuento. En ese sendero la humanidad se ha sobrepuesto progresivamente a su rechazo casi ancestral por lo incierto y lo ha incorporado de manera creciente a su cosmovisión. La sociedad de la "Babilonia" de Borges termina, como la física, reconociendo que sus fundamentos están embebidos de incertidumbre.

La física, la química y la biología nos impulsan a que aceptemos a lo azaroso como un rasgo esencial del universo y que reconozcamos que existen fenómenos naturales que son irreduciblemente inciertos. Lejos de ser esa una cualidad negativa como podría bien haber cuadrado a Aristóteles, ese azar, propio del mundo natural, es una fuente inagotable de diversidad, riqueza y estructura.

En el cuento de Borges la organización social de Babilonia es posible aun en presencia de circunstancias impredecibles y cambios arbitrarios. Del mismo modo, el azar y el orden que pueden parecer antinómicos, conviven, y es gracias a esta convivencia que el universo que nos rodea es más amigable y nos ofrece una multiplicidad de facetas y posibilidades.

La vida es posible gracias al desorden que aporta la agitación térmica propia de la superficie de nuestro planeta. Las células vivas pueden transportar complejas sustancias aprovechando, en algunos casos, el aporte del movimiento browniano que está presente en su seno. Ese milagro de la vida ha evolucionado dando lugar a estructuras de increíble complejidad gracias a lo azaroso del proceso de reproducción y de la herencia. En esa evolución surgieron sensores que permiten obtener información gracias al aporte de los cambios azarosos del medio. La organización social de comunidades de seres vivos se aprovecha de lo incierto para alcanzar nuevos y más eficaces niveles de organización.

La lección, sin embargo, se completa con un mensaje de medida. Sólo una cuota adecuada de incertidumbre es la que puede hacer surgir algún tipo de orden. Si la agitación térmica es excesiva la vida no es posible; en el límite de lo muy pequeño, la convivencia fecunda del azar y el orden que puede dar lugar a fascinantes mecanismos de procesamiento de la información, puede desmoronarse si los sistemas sucumben a la decoherencia, las sucesivas generaciones no puede retener caracteres exitosos si las mutaciones son demasiado frecuentes y las comunidades de seres vivos se sumen en un caos si los cambios individuales de sus agentes son demasiado intensos y frecuentes.

Apenas estamos comenzando a aprender esa lección en todo su alcance. Creo que está comenzando a surgir una verdadera ingeniería del azar, un cuerpo de prácticas y de conocimientos que permite utilizar constructivamente la incertidumbre inherente al mundo que nos rodea. La mecánica cuántica forma parte cada vez más importante del universo de las cosas prácticas de las que nos servimos cotidianamente, las realizaciones basadas en la nanotecnología sujetas a las fluctuaciones térmicas y del microcosmos cambiarán seguramente el mundo que nos rodea, la búsqueda de drogas y compuestos replicando en el laboratorio procesos evolutivos es una realidad y la ingeniería diseña complejos sistemas recurriendo a algoritmos evolutivos. El orden que surja del azar y la incertidumbre nos depara un futuro promisorio y excitante.

En esta comunicación he repasado algunos trabajos recientes en los que pude participar gracias a la inestimable colaboración de numerosos colegas. Entre ello debo mencionar a Enrique Burgos y Horacio Ceva, a Daniel Heymann y Andrés Schuschny, a Hernán Dopazo, Mirta Gordon y Sebastián Risau-Gusman, a Alejandro Fendrik, Lilia Romanelli y Florencia Carusela, a Juan P. Paz y César Miquel. Todas esas colaboraciones fueron posibles gracias a su enorme generosidad.

Bibliografía

- [1] "Ensayo filosófico sobre las posibilidades". Pierre S. Laplace, traducción publicada en Ediciones Altaya, Barcelona, 1995.
- [2] "Adaptation in Natural and Artificial Systems: An introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence". John H. Holland, 2nd Edition. MIT Press, Cambridge Mass. 1992,
- [3] "Genetic algorithms in Search, Optimization and Machine learning". David E. Goldberg, Addison Wesley Publishing Co. Inc. 1989.
- [4] "A model for the interaction of learning and evolution". H. Dopazo, M. Gordon, R.P.J. Perazzo, y S. Riseau-Gusman. Bull. Math. Biol. 63 (2001) 117-134.
- [5] "Mutual influences of learning and biological evolution", H. Dopazo y R.P.J. Perazzo, Complexity International 9 (2002) (<http://www.csu.edu.au/ci/vol09/dopazo01/>)
- [6] "A model for the emergence of adaptive subsystems" H. Dopazo, M. Gordon, R. P. J. Perazzo, y S. Risau-Gusman. Bull. Math. Biol. XX (2002), WWW
- [7] "The design of natural and artificial adaptive systems". Frank, S.A. en "Adaptation", M. Rose and G. Lauder (eds.), Academic Press, N.Y, 1996 pp. 451-505.
- [8] "Learning and Imitation: Transitional Dynamics in Variants of the BAM". D. Heymann, R.P.J.

- Perazzo and A. Schuschny. Adv. Comp. Sys. 7 (2004) 21-38.
- [9] "Complexity in Economic Theory: Inductive Reasoning and Bounded Rationality". Arthur, W. B. AEA Papers and Proceedings, 84, Nmbr 2, (1994) 406-411.
- [10] "Quenching and annealing in the minority game". E. Burgos, H. Ceva R. Perazzo, Physica A294, (2001) 539-546.
- [11] Referencias a este tema se pueden encontrar en <http://www.unifr.ch/econophysics>. Se pueden destacar: D.Challet y Y.C. Zhang, Physica A246 (1997) 407; Physica A256 (1998) 514; R.Savit, R. Manuca y R. Riolo Phys Rev. Lett 82 (1999) 2203; A. Cavagna Phys Rev E59 (1999) R3783, N.F. Johnson, P.M. hui, R. Jonson y T. S. Lo Phys Rev Lett 82 (1999) 3360.
- [12] "Dynamical quenching and annealing in selforganization multiagent models". E. Burgos, H. Ceva y R. P. J. Perazzo Phys. Rev. E64 (2001) 016130.
- [13] "Thermal treatment of the minority game". E. Burgos, H. Ceva, R. Perazzo, Phys. Rev.E65 (2002) 036711.
- [14] "The evolutionary minority game with local coordination". E. Burgos, H. Ceva y R. P. J. Perazzo Physica A337 (2004) 635-644 y.
- [15] "Order and disorder in the local evolutionary minority game". E. Burgos, H. Ceva y R. P. J. Perazzo Physica A354 (2005) 518-538.
- [16] "The theory of stochastic resonance" B. McNamara and K. Wiesenfeld, Phys. Rev. A39, (1989) 4854; "Stochastic resonance" L. Gammaitoni, P. Hänggi, P. Jung, and F. Marchesoni, Rev. Mod. Phys. 70, (1998) 223.
- [17] "Fault tolerance in noise-enhanced propagation", R. Perazzo, L. Romanelli and R. Deza., Phys. Rev. E 61, (2000) R3287.
- [18] "Information transmission and storage sustained by noise". M.F.Carusela, R.P.J. Perazzo and L. Romanelli. Physica D (en prensa).
- [19] "Stochastic resonance and Brownian ratchets". A.Fendrik, L.Romanelli y R.P.J. Perazzo Physica A359 (2006) 75.
- [20] "Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer" D. Deutsch, Proc. Roy. Soc. Lond. A400 (1985) 97-117.
- [21] "Quantum computational networks". D. Deutsch Proc.Roy.Soc. Lond. A425 (1989) 73-90.
- [22] "Proceedings of the 35th. Annual Symposium on Foundations of Computer Science". Editado por S. Goldwasser (IEEE Computer Society, Los Alamos Ca.)1994. contribución de P. Shor.
- [23] "Factoring in a dissipative quantum computer". C. Miquel, Juan P. Paz y Roberto Perazzo Phys Rev A54 (1996) 2605-2613.
- [24] "The emperor's new mind" Oxford University Press,1989 y "Shadows of the mind" Oxford University Press, 1994, Roger Penrose.

Trabajo recibido y aceptado en julio de 2004.