

Es la naturaleza regular?

I.

INTRODUCCION

LUIS ALBERTO TORO C.
Ingeniero Químico
Maestro en Ciencias Matemáticas
Profesor Facultad de Ingeniería Mecánica
y de Manufactura
Universidad Autónoma de Manizales

El gran poder de la ciencia reside en su capacidad de relacionar causa y efecto. Basándose en las leyes de la gravitación, por ejemplo, se pueden predecir los eclipses con años de antelación, o retroceder en el pasado y determinar con precisión la fecha en que alguno ocurrió. Un ejemplo particularmente expresivo de esto último, es el llamado «eclipse de Heródoto». Cuenta este historiador griego, que cuando los Lidios y los Medos se enfrentaban en una batalla, «el día se transformó súbitamente». El eclipse que había sido predicho por Tales de Mileto, produjo tal consternación en los guerreros, que cesaron inmediatamente el combate e hicieron la paz. Heródoto no dio la fecha de la batalla y de la cual no se tiene otro dato histórico. Sin embargo, se sabe hoy que tuvo lugar en las horas de la tarde del 28 de mayo del año 584 A. C. Para ello, los astrónomos resolvieron las ecuaciones del sistema solar a partir de su estado actual, lo que permite asegurar que esa fue la fecha del eclipse.

No es de extrañar entonces que los conocimientos de la física y de las ciencias naturales, ejerzan una

poderosa influencia en nuestra concepción del mundo. Esta se ha visto transformada por las revoluciones que conmovieron la física en sus cimientos. A través de la comprobación, innumerables veces repetida de las leyes de la física, se forjó nuestra convicción de que los fenómenos de la naturaleza siguen leyes férreas.

En este artículo, al hacer una revisión histórica de los diferentes paradigmas que desde el punto de vista de la física han intentado explicar los fenómenos de la naturaleza, se resalta un hecho bien importante: en contra de la idea que se tiene de la ciencia como DESCRIPCIÓN DE LA REGULARIDAD DE LA NATURALEZA, la mayoría de los sistemas dinámicos deterministas tienen comportamientos tan complejos que resulta imposible toda predicción detallada para tiempos grandes y su estudio resulta sumamente difícil.

La palabra «paradigmas» se utiliza en el sentido de la definición de Thomas S. Khun, en su ensayo «La Estructura de las Revoluciones Científicas»: «Realizaciones científicas universalmente aceptadas que, durante cierto tiempo, proporcionan modelos de problemas y soluciones a una comunidad científica».

II. EL AZAR

Fueron los griegos quienes descubrieron que en las cosas hay algo que permanece, algo que ES, y algo que CAMBIA, que está llegando a ser El enfrentamiento entre las doctrinas antagónicas de Parménides y de Heráclito, condujo a Leucipo (430 a. c.) y luego a Demócrito (461-371 a. C.), a la idea del átomo, que es quizá la más importante del pensamiento científico. Si las cosas están hechas de pequeñas partículas, indivisibles e indestructibles, hay algo en ellas que permanece, mientras que sus innumerables choques introducen lo aleatorio y lo impredecible, es decir, el AZAR. De paso, diremos que fue John Dalton quien en el siglo XIX retomó la

idea atomista de la materia y la convirtió en una teoría coherente como formulación racional de las leyes de las combinaciones químicas, base experimental de la moderna teoría atómica.

III. EL PARADIGMA ARISTOTELICO

La física de Aristóteles (384 - 322 A. C.) es falsa y completamente caduca. Pero, es una FÍSICA, es decir, una ciencia altamente elaborada, aunque no matemática. Es una TEORÍA, que partiendo naturalmente de los datos del «sentido común» lo somete a un tratamiento en extremo coherente y sistemático.

Los hechos o datos que sirven de fundamento a esta teoría son muy simples y en la práctica los admitimos exactamente como lo hacía Aristóteles. Encontramos «natural» ver caer una piedra «hacia abajo». En cambio calificaríamos de ir «contra natura» si viéramos elevarse libremente la piedra por los aires, y buscaríamos la explicación en algún mecanismo oculto. De modo semejante, hallamos «natural» ver la llama de una cerilla dirigirse hacia arriba, y alguna explicación buscaríamos si la llama se dirigiese hacia abajo.

La distinción entre movimiento «natural» y movimiento «violento» se sitúa en una concepción global de la realidad física que se apoya en: a) la creencia en la existencia de naturalezas cualitativamente distintas, y b) la creencia en la existencia de un cosmos, es decir, la creencia en la existencia de principios de orden en virtud de los cuales el conjunto de los seres reales forma un todo jerárquicamente ordenado.

Lo anterior, implica que en el universo, las cosas están o deben estar distribuidas y localizadas en un entorno determinado. La localización de un objeto no es indiferente ni para él ni para el resto del universo. Cada cosa tiene un «puesto» determinado según su naturaleza. El concepto de «lugar natural»

es la exigencia teórica de la física Aristotélica y se funda en una concepción estática del orden. Si cada cosa estuviese «en orden», también estaría en su lugar natural y allí se quedaría para siempre. Para expulsarlo se necesitaría ejercer «violencia» sobre él. Un objeto expulsado de su lugar natural, buscaría volver a su «puesto». Así todo movimiento implica una especie de desorden, una perturbación del cosmos, ya que es o un efecto directo de la «violencia» o un esfuerzo del ser por volver a su lugar natural, recobrándose el orden y equilibrio perdidos. Esta vuelta al orden es precisamente lo que se llama «movimiento natural». El orden constituye un estado duradero que tiende a perpetuarse indefinidamente. He aquí la estructura fundamental en la que se funda la física Aristotélica. De ella se deducen consecuencias tales como: la causa del movimiento natural, «el motor», es la naturaleza misma del cuerpo, su «forma» que trata de volverlo a su puesto y mantiene su movimiento; para el movimiento violento, que es «contra naturam» es necesaria la acción continua de un motor externo unido al cuerpo movido. Si se quita el motor, el movimiento se detiene. Para el Estagirita cada transmisión del movimiento implica contacto, no hay acción a distancia. Para mover un objeto hay que tirar de él o empujarlo.

Además de ser falsa, la física

Aristotélica es desmentida por el lanzamiento de proyectiles, cuyo movimiento continúa a pesar de la ausencia de «un motor». La respuesta de Aristóteles - aquí reside su genialidad - es explicar el movimiento del proyectil, que aparentemente no tiene motor, por la reacción del medio ambiente aire o agua.

La física Aristotélica dominó el pensamiento científico durante casi dos milenios

IV. EL PARADIGMA MECANICISTA

En el siglo XVI, se inicia la ruptura definitiva con la física, dos veces milenaria, de Aristóteles. Juan Bautista Benedetti (1530 - 1590), intentó erigir, sobre la base de la estática de Arquímedes una física o, para usar su propio término, una «filosofía matemática» de la naturaleza, como una oposición consciente y reflexiva a la física empirista y cualitativa de Aristóteles. El mérito de la ruptura definitiva le corresponde a Galileo (1564 - 1642), de quien podemos decir que es el primer científico moderno. A Galileo lo que le anima es la gran idea - arquimediiana - de la física matemática, de la reducción de lo real a lo geométrico. Por ello geometriza el universo, identificando el espacio físico con el de la geometría euclídea y formula el concepto de movimiento que es la base de la dinámica clásica. El universo galileano no está de manera alguna limitado a la bóveda

.....

...la mayoría de los sistemas dinámicos deterministas tienen comportamientos tan complejos que resulta imposible toda predicción detallada para tiempos grandes y su estudio resulta sumamente difícil.

celeste. Admite que el movimiento es una ENTIDAD o un ESTADO tan estable y perdurable como el estado de REPOSO; que no se necesita una fuerza constante que obre sobre un móvil para explicar su movimiento. Al admitir la relatividad del espacio y del movimiento, abrió la posibilidad de aplicar a la mecánica las leyes estrictas de la geometría. Así, la matemática se perfiló como herramienta básica para el análisis y comprensión de las leyes y fenómenos de la naturaleza. Antes de la ciencia galileana, el mundo real se aceptaba como el que se ofrecía a nuestros sentidos. Con y después de Galileo se presenta una ruptura entre ambos mundos: el de la ciencia y el de los sentidos. El mundo real es la geometría hecha cuerpo, es la geometría realizada. Con esta ruptura salimos del renacimiento y sobre la base de la física galileana y de su interpretación cartesiana, se construirá la ciencia tal como la conocemos, nuestra ciencia. Así podrá construirse la monumental y extensa síntesis del siglo XVII, fruto del genio de Isaac Newton (1642 - 1727). El gran descubrimiento de Newton consistió

en que los movimientos de los cuerpos en la tierra y en los cielos siguen las mismas leyes; no existiendo por lo tanto una física de los cielos y una de la tierra. El gran proyecto de unificación lo lleva a cabo a través de sus tres famosas leyes y su gran ley de la gravitación universal, que son el fundamento de la dinámica clásica. En el siglo XVIII, Leonhard Euler (1707 - 1783), desarrolló e hizo operativa la dinámica al encuadrarla en el formalismo de las ecuaciones diferenciales. Esto hizo que se comprendiera a fondo una propiedad muy importante de la teoría newtoniana: las soluciones de las ecuaciones del movimiento quedan determinadas para todo tiempo pasado o futuro, una vez conocidas sus condi-

ciones iniciales. De aquí se sacó una conclusión altamente significativa: conociendo el presente, se puede predecir el futuro o retroceder al pasado. El tiempo se encargó de confirmar la conclusión aludida y uno de los mayores triunfos se obtuvo en astronomía matemática: la noche del 1 de Enero de 1801 G. Piazzi (1746 - 1826) descubre el asteroide de Ceres y lo observa durante 41 noches consecutivas y usando éstos datos Karl Friedrich Gauss (1777 - 1855), calculó la órbita. El asteroide fue detectado de nuevo el 1 de Enero de 1802, justo en la posición donde los prolijos cálculos del joven Gauss habían predicho. Tal hecho causó una gran

comoción en el ambiente científico e intelectual del naciente siglo XIX. Surgió entonces el mito de la predictibilidad del mundo de los astros, reforzando poderosamente la convicción mecanicista de que el universo se comporta como una gran máquina que sigue leyes deterministas férreas e inalterables. La razón parecía estar del lado de la necesidad y de Parménides. El cambio, el devenir Heraclíteo e incluso el mismo

tiempo, son meras ilusiones, pues no había nada que antes no estuviese ya. En 1814, Pierre Simón de Laplace (1749 - 1827) publica su «Ensayo Filosófico sobre las Probabilidades», que es una introducción soberbia y lúcida, no técnica, a las leyes del azar. Contiene, lo que se considera como el más perfecto exponente de la interpretación determinista del universo, un símbolo de que aquella época feliz y confiada en que se suponía que el pasado podía descubrirse y el futuro predecirse basándose en una simple instantánea del presente. Así escribió Laplace: «Cuando contemplamos el estado actual del universo debemos considerarlo como un efecto del estado anterior y como la causa del que debe seguirlo.



Supongamos por un momento una inteligencia que pudiese comprender todas las fuerzas que animan la naturaleza y su respectiva situación, junto con la de los seres que la componen - una suficiente inteligencia, basta para someter estos datos al análisis -; ésta incluiría en una misma fórmula los movimientos de los grandes astros y los de los átomos más ligeros; nada sería incierto para ella y tanto el futuro como el pasado estarían ante sí». Basado en esta interpretación violentamente radical del determinismo newtoniano, inició el mecanicismo su gran apoteosis, afirmándose la opinión dominante de que en el universo no ocurría más que el desarrollo inexorable de la causalidad férrea. Pues si la sucesión de los más diversos acontecimientos está fijada de antemano, no somos más que partes de un engranaje al que estamos sometidos, querámoslo o no. Si todo está predeterminado no hay lugar para el azar. Las leyes de NEWTON fueron sacadas del dominio para el cual fueron establecidas. Extrapoladas ilícitamente desde la astronomía hasta las ciencias biológicas e incluso sociales, se llegó a negar la libertad humana, pues se la creyó incompatible con las leyes de la física y de la química; aseverando además que las sociedades evolucionan según leyes tan férreas como las de los astros.

V. LAS TRES RUPTURAS DEL MECANICISMO

.....

Basado en esta interpretación violentamente radical del determinismo newtoniano, inició el mecanicismo su gran apoteosis, afirmándose la opinión dominante de que en el universo no ocurría más que el desarrollo inexorable de la causalidad férrea.

Desde la formulación por Laplace del determinismo radical, el papel de las probabilidades en la interpretación del mundo material ha ido ampliándose. Ello obedeció a que el mecanicismo se fragmentó por tres fuentes:

1. Por la de los sistemas complejos con demasiadas variables, para los que resulta imposible seguir la huella de cada una de ellas y debemos recurrir al empleo de promedios y leyes probabilistas.
2. Por la de los sistemas cuánticos, como átomos, moléculas, núcleos, partículas elementales, para cuya descripción se recurre a leyes diferentes de las newtonianas.
3. Por la de los sistemas caóticos, cuyo comportamiento es muy complejo: Son a la vez deterministas e impredecibles.

VI. PRIMERA RUPTURA: SISTEMAS COMPLEJOS Y MECANICA ESTADISTICA.

La necesidad de estudiar sistemas con muchos elementos - un gas confinado en un recipiente, por ejemplo - provocó el surgimiento de una tradición enteramente distinta de la mecanicista para enfrentar el análisis de algunos aspectos de la realidad.

En el dominio de la mecánica estadística, se consideran las sustan-

cias desde el punto de vista microscópico y no macroscópico, y además se tienen en cuenta las diferencias existentes en las características dinámicas de los átomos (o de las moléculas). Es posible, en principio, aplicar las leyes de la mecánica a cada molécula individual de un gas y determinar así el comportamiento del sistema. Sin embargo, el movimiento de las partículas individuales, como el de las moléculas de un gas, es complicado, dependiente del tiempo y difícil de seguir. De otra parte, las propiedades macroscópicas de una sustancia están determinadas por el comportamiento promedio de un elevado número de moléculas que por el de una sola en un tiempo determinado. Por ejemplo, una molécula de un gas puede mostrar un espectro de velocidades amplias y variable, en un período breve, desde cero hasta valores muy grandes. Pero la velocidad media de la molécula en el gas es de más interés a la hora de interpretar sus propiedades macroscópicas como la presión y la temperatura.

Lo anterior muestra claramente que la mecánica newtoniana no es apropiada para estudiar sistemas con muchos elementos y que es necesario, para abordarlos, recurrir a leyes estadísticas y probabilísticas. Para un sistema de tal naturaleza es irrelevante preguntarse: ¿Cuál será su estado al cabo de cierto tiempo?. La mecánica estadística, creada por Maxwell, Boltzman y Gibbs en la segunda mitad del siglo XIX, formula leyes para magnitudes promedio y asigna probabilidades a las variables (velocidad, energía y cantidad de movimiento) y los estados de las moléculas individuales, abriéndose así una puerta al azar en el edificio newtoniano. Llegado a este punto, deseo consignar un hecho lamentable, que llena de luto la historia del pensamiento científico de comienzos del siglo XX: Ludwig Boltzman (1844 - 1906), físico austriaco, dedicó sus últimos años a pensar cómo las colisiones entre los átomos introducen el azar en la naturaleza, una de las razones por las que Demócrito desarrolló su teoría atómica más de 2.000 años antes. Boltzman se encaró frontalmente al reto de establecer sólida-

mente las probabilidades en el ámbito de la física, en contra de la posición antagonista establecida. Pero fue tal la incompreensión de sus contemporáneos que esto fue uno de los detonantes de la depresión que lo llevó al suicidio en 1906. Con todo, al empezar el siglo, las probabilidades estaban firmemente establecidas en la física.

VII. LA SEGUNDA RUPTURA: EL PARADIGMA CUANTICO

Es bien difícil de exponer, aunque sea en forma superficial, la mecánica cuántica sin recurrir al formalismo matemático, ya que precisamente es dicho formalismo lo esencial de esta mecánica nueva. Sin embargo, destacaremos sus rasgos principales, como sus radicales consecuencias para la interpretación del mundo físico. Pero antes un poco de historia: El 14 de diciembre de 1900, Max Planck (1858 - 1947) leyó en la sociedad alemana de física, un trabajo intitulado «La teoría de la ley de distribución de energías del espectro normal». Dicho trabajo fue el precursor de una vasta revolución en la física. En su trabajo, Planck presentó la hipótesis cuántica: el intercambio de energía entre materia y radiación de frecuencia f se hace por múltiplos en-



teros de hf , siendo h una constante universal. Las consecuencias de tal hipótesis eran tan extrañas, que Planck la consideró como mera hipótesis de trabajo y durante los 10 años siguientes trató de ajustar las ideas cuánticas al electromagnetismo clásico, pero sin resultado alguno. En sus propias palabras: «mis vanos intentos de ajustar el quantum elemental de acción (esto es la cantidad h) en alguna forma a la teoría clásica, siguieron durante varios años y me costaron gran esfuerzo». Finalmente aceptó que su hipótesis era correcta y de un profundo significado, ya que servía de apoyo al concepto estadístico de entropía y de la tercera ley de la termodinámica.

De esta forma hacen su aparición los quanta (paquetes de energía) en la física. Así se expresó Louis de Broglie acerca de los quanta: «tenía yo 20 años cuando comencé a ocuparme de ello y hace por tanto un cuarto de siglo que medito sobre el tema. Pues bien, debo confesar humildemente que he llegado en mis meditaciones a comprender algo mejor algunos de sus aspectos, pero no sé todavía con exactitud lo que se oculta detrás de la máscara que cubre su faz.

Sin embargo, me parece que puede afirmarse una cosa: a pesar de la importancia y extensión de los adelantos realizados por la física en los últimos siglos, en tanto que los físicos han ignorado la existencia de los quanta nada pudieron comprender sobre la naturaleza íntima y profunda de los fenómenos físicos, pues sin los quanta no habría ni luz, ni materia y, si se permite parafrasear un texto evangélico, puede decirse que nada de aquello que ha sido hecho se ha hecho sin ellos». Esto fue escrito en 1937. A pesar de ello De Broglie, Planck, Einstein y Schrodinger que fueron a la vez padres y heresiarcas de la mecánica cuántica, se negaron a aceptar sus consecuencias radicales. Con la introducción de los cuantos, el vasto y grandioso edificio de la física clásica se estremeció en sus cimientos. Al mirar en retrospectiva la historia del pensamiento científico, se hallan pocos cataclismos comparables a éste.

La elaboración definitiva de la nueva mecánica se realizó entre los años 1923 - 1927, consagrando el INDETERMINISMO esencial e irreductible de las leyes que rigen el comportamiento de la materia. En mecánica cuántica, las magnitudes físicas no tienen valores bien determinados y las leyes básicas asignan probabilidades a los resultados de las medidas, incluso cuando se refieran a procesos elementales en los que interviene una sola partícula.

Una de las consecuencias más radicales de la teoría cuántica ésta contenida en el «PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISEMBERG», también llamado principio de INDETERMINACION. Un ejemplo puede ayudarnos a entender lo que el principio expresa: en el proceso de realizar observaciones, el observador interactúa con el sistema, como cuando se mide con precisión la posición de la Luna, haciendo rebotar sobre su superficie ondas de radar. Aquí el movimiento de aquélla es perturbado por la medición, pero su masa es tan grande que se puede ignorar.

A una escala más pequeña, como un experimento macroscópico bien realizado en la tierra, los efectos perturbadores son generalmente pequeños o al menos controlables y se pueden tener en cuenta de



antemano por cálculos adecuados. Por lo tanto, desde el punto de vista de la física clásica, se suponía de modo natural, que en el campo de los sistemas microscópicos que involucran electrones, protones o neutrones, tanto la posición como su impulso (producto de la masa por la velocidad de la partícula) se podían obtener mediante observaciones similares. Sin embargo, físicos como Bohr y Heisenberg pusieron en tela de juicio dicha suposición.

En un experimento real, se puede determinar la posición y el impulso de un electrón o de un fotón, en el mismo instante?. Los físicos cuánticos responden: no más exactamente que lo permitido por el principio de incertidumbre de Heisenberg. Lo anterior significa que no se puede medir simultáneamente el valor exacto de una componente del impulso, por ejemplo en la dirección del eje X, de un electrón, y también el valor exacto de la coordenada correspondiente en la misma dirección. De otra parte la precisión de la medición está limitada por el proceso de medida en sí, de modo tal que el producto de la incertidumbre en la medida de la componente del impulso y de la correspondiente coordenada, siempre es mayor o igual que h (constante de Planck) dividida entre 4 veces π . Lo mismo sucede cuando se involucran medidas de energía y tiempo, como en el caso de un fotón emitido por un átomo. Es importante hacer notar que éste principio no tiene ninguna relación con los adelantos en los instrumentos que conduzcan a mejores determinaciones simultáneas de las magnitudes involucradas. Aún disponiendo de instrumentos ideales, jamás podremos superar la desigualdad enunciada. El principio de INDETERMINACION ha resistido hasta el momento todos los argumentos esgrimidos para derribarlo. La indeterminación es parte fundamental de la naturaleza y es por ello irreductible.

Las probabilidades cuánticas son esenciales y no reductibles a ningún tipo de determinismo.

Finalmente, el principio de Heisenberg nos lleva en otra dirección: nuestra capacidad de conocimiento de la naturaleza es limitada y es ella misma la que nos impone dicha limitación. Así las cosas, y al contrario de lo que pensaba Einstein, uno se siente tentado a afirmar que realmente Dios si juega a los dados.

VIII. LA TERCERA RUPTURA: EL CAOS Y LOS SISTEMAS DINÁMICOS. UN NUEVO PARADIGMA?

A comienzos de éste siglo, Henry Poincaré (1854 - 1912) descubrió la posibilidad de movimientos caóticos en problemas de mecánica celeste. Al estudiar el modelo de un sistema bisolar con un solo planeta, indicó que éste puede desarrollar movimientos totalmente caóticos, aleatorios, pese a que responde a las leyes estrictas de la mecánica newtoniana.

En el campo de la biología, se encuentran especies cuya población en un territorio (pájaros en un bosque, una bacteria que infecta a un ser humano) tienden a un nivel normal, natural; otras en las que la población varía cada cierto periodo (con tiempos de abundancia y de escasez) y finalmente otras, en las que el número de individuos varía erráticamente, sin ninguna pauta regular.

Los fluidos presentan movimientos regulares, en los que las partículas del mismo siguen líneas de corriente determinadas que se separan lentamente de modo lineal en el tiempo. Además, dos partículas que pasan por un mismo punto con un intervalo pequeño de tiempo, siguen la misma línea de corriente.

Sin embargo, ninguna de las anteriores características aparecen en el llamado flujo turbulento, en el cual las partículas que en cierto momento estaban próximas, se separan de prisa, de modo exponencial y sus trayectorias no guardan ninguna relación al cabo de un corto tiempo, por lo que se dice que olvidan las condiciones iniciales.

Los ejemplos citados, pertenecientes a disciplinas tan disímiles en apariencia, resaltan un hecho bien importante: a pesar de ser deterministas, presentan un comportamiento impredecible. Sistemas como los ejemplificados, son estudiados por la llamada TEORÍA DE LOS SISTEMAS DINÁMICOS, de cuyo marco general emerge el CAOS. Un sistema dinámico comporta dos componentes: la noción de ESTADO (información esencial sobre el sistema) y una DINÁMICA (una regla que describe la evolución del estado en el tiempo). Los sistemas dinámicos deterministas clásicos se agrupan en dos categorías: los DISCRETOS, en los cuales una o más variables toman valores en momentos discretos del tiempo. Un ejemplo típico de esta situación podría ser el número de individuos de una especie biológica en un territorio determinado; y los CONTINUOS, en los cuales las variables son funciones del tiempo que obedecen a ecuaciones diferenciales, tal como un péndulo sometido a una fuerza que varía periódicamente con el tiempo.



Uno de los resultados más sorprendentes de la física de los últimos 30 años, es la comprobación de que la mayoría de los sistemas dinámicos deterministas clásicos, presentan movimientos tan complejos que a medida que aumenta el tiempo, resulta imposible toda predicción sobre su estado final. Estos tipos de sistemas se denominan turbulentos, caóticos o estocásticos.

La principal característica de un sistema caótico es su sensibilidad a pequeñas variaciones en las condiciones iniciales: partiendo de dos estados muy próximos entre sí y dejando que el sistema evolucione en

el tiempo, al cabo de cierto tiempo las dos trayectorias seguidas por el sistema no se parecen en nada. Se dice entonces, que el sistema olvida las condiciones iniciales o que no tiene memoria del pasado. En otras palabras, en un sistema caótico un pequeño cambio en el presente, causa otro mucho mayor en el futuro.

Lo anterior puede interpretarse de otra forma: al hacer mediciones para las condiciones iniciales, se introducen errores en el sistema debido a imprecisiones en las mediciones o a las necesarias aproximaciones que se realizan en los métodos de

cálculo; con el paso del tiempo el error se vuelve incontrolable, de tal manera que se pierde toda información sobre el sistema y éste se vuelve impredecible. La única manera de no introducir error en el sistema, es conociendo su estado actual (inicial) con error nulo, es decir, con infinitas cifras decimales. Sin embargo, somos criaturas finitas y ello no puede ser.

De suerte que los sistemas dinámicos al presentar comportamientos regulares y caóticos, nos revelan una visión de un mundo probabilista, en la que se enlazan cadenas causales deterministas que terminan cuando se destruye totalmente la información sobre el estado inicial de aquéllos. De este modo, orden y caos, determinismo y probabilidades se juntan y complementan, resultando así un mundo más complejo y rico en sus posibilidades, que la fría visión del mecanicismo.

Deseo finalizar estas notas con dos citas, provenientes de dos visiones diferentes del universo, muy alejadas en el tiempo, pero cercanas en cuanto dicen de nuestra capacidad de conocimiento de la naturaleza:

«Es a causa de nuestra debilidad y de nuestra ignorancia que existe el azar para nosotros; e, incluso sin salir de nuestra debilidad humana, lo que es azar para el ignorante no lo es para el sabio. El azar es la medida de nuestra ignorancia. Los fenómenos fortuitos son por definición, aquellos cuyas leyes ignoramos» (H. Poincare).

«Cuanto más apliqué mi corazón a estudiar la sabiduría y a contemplar el ajetreo que se da sobre la tierra - pues ni de día ni de noche los ojos concilian el sueño - fui viendo que el ser humano no puede descubrir todas las obras de Dios, las obras que se realizan bajo el sol. Por más que se afane el hombre en buscar, nada descubre, y el mismo sabio, aunque diga saberlo, no es capaz de descubrirlo» (Eclesiastés, 8, 16-17).

BIBLIOGRAFIA

EISBERG, Robert ; RESNICK, Robert. Física Cuántica. Editorial Limusa, 1978.

DE BROGLIE, Louis. La física Nueva y los Cuantos. Editorial Losada, 1952.

HEISENBERG, Werner. «El Principio de Incertidumbre», en «SIGMA: El Mundo de las Matemáticas». Vol.2. Editorial Grijalbo, 1952.

POINCARÉ, Henry. «El Azar», en Ibidem. Vol.3.

LAPLACE, Pierre Simón. «Sobre las Probabilidades», en Ibidem. Vol. 3.

FERNANDEZ R., Antonio Et al. «Orden y Caos», en Scientif American. 1990.