

Análisis comparativo de la Teoría del Caos en Electrónica, Fotónica, Cardiología y Psiquiatría: algunas consideraciones sobre su interacción *

Ana González Marcos
J. A. Martín-Pereda

Arbor CXLV, 572 (Agosto 1993) 83-100 pp.

En el presente artículo se ofrece una visión global del estudio de cuatro entornos tecnológicos, aparentemente alejados entre sí, pero que, según se mostrará, pueden ser estudiados con un tratamiento análogo, gracias a la Teoría del Caos. Se ofrecerá una visión histórica de los mismos y cómo de ella pueden inferirse consecuencias para el estudio de otras áreas diferentes.

I. Introducción

La Ciencia ha tenido siempre, desde el mismo inicio de la existencia del hombre y bajo diferentes epígrafes, dos

* Este artículo es la segunda parte del publicado en el nº 571 (Julio 1993).

objetivos centrales. Uno ha sido el de conocer las leyes y los mecanismos que mueven al conjunto de todas las cosas que abarca el Universo, desde las más pequeñas y próximas, hasta las más lejanas e incommensurables. El otro se ha centrado en intentar llegar a saber cuál es la raíz del ser humano y cuáles son las causas de que éste razone y sienta. Ambas se han multiplicado en una larga serie de actividades, tanto de carácter científico como técnico, y tanto bajo enfoques filosóficos como pragmáticos.

La evolución del conocimiento ha hecho que hoy esa raíz común, que no era sino el propio hombre, haya sido en parte olvidada. Las ramas han ido creciendo y, poco a poco, han hecho que casi se haya olvidado el tronco inicial. Dejando aparte las múltiples tecnologías nacidas a lo largo de los siglos, y cuyo fin último ha sido siempre el de mejorar la situación del hombre, y también de la sociedad que éste ha creado, frente a los elementos adversos que le han ido rodeando, las diferentes ciencias se han multiplicado dejando de tener contacto unas con otras. Si la raíz fue común fue el hombre, una vez que las ramas han crecido, parece lógico que se vuelva a él.

El objeto del presente artículo es, más que hacer una serie de reflexiones en torno a los anteriores hechos, que ya de por sí han merecido hasta hoy, y merecerán en el futuro, innumerables páginas, el de presentar una visión un tanto parcial de dos segmentos del conocimiento e intentar ver cómo ambos pueden conjugarse unidos para acercarse al objetivo planteado. Estos dos segmentos son los derivados por un lado de una de las tecnologías consideradas como «duras», como es la Tecnología Foelectrónica, y por otro, de una de las ramas de la Medicina aplicada, que es la que tiene como fin justificar y determinar el comportamiento humano. Según veremos, ambos tienen un conjunto de cosas en común que puede hacer que el avance en uno repercute significativamente en el del otro. En primer lugar los veremos por separado y, al final, intentaremos aunarlos en una idea común.

Y para ello, como ya ha sido planteado recientemente en otro artículo ¹, una de las últimas ramas de la Ciencia que, parece, puede servir para lograr el objetivo anterior es la que trata de aclarar todos aquellos fenómenos de compor-

tamiento complejo que hasta hace muy poco eran tema tabú para la mayor parte de los científicos. En este campo han confluído primeras figuras de especialidades ajenas entre sí y, poco a poco, parece que van encontrando muchos puntos en común. Es muy posible que esa teoría, la Teoría de la Complejidad o del Caos como se la conoce, no sea la única que pueda lograr lo anterior. Es posible, también, que no sea la mejor y que, dentro de un tiempo, se la olvide. Pero a pesar de ello, dada la situación actual es, desde nuestro punto de vista, la única que puede ser capaz de aglutinar hoy el más amplio espectro de actividades posibles. Por ello será la base para los dos casos que vamos a ver aquí.

II. Teoría de la complejidad y el caos en sistemas electrónicos y fotónicos

2.1. *Comportamientos caóticos en circuitos electrónicos*

La Electrónica fue uno de los primeros campos de la Tecnología en el que se encontraron comportamientos complejos y anormales que luego han resultado ser caos. Tanto en circuitos muy simples, con poco más que un elemento no lineal, como en otros más complicados, la aparición de fenómenos no lineales ha estado siempre presente y ha dado lugar a soluciones planteadas deliberadamente con el único fin de evitarlos.

De acuerdo con lo anterior, el ingeniero de circuitos electrónicos ha tratado siempre de trabajar con teorías lineales. El comportamiento de los circuitos no-lineales siempre se ha considerado como una visión distorsionada de lo que ocurría en los lineales y se ha enfocado su estudio mediante desarrollos en serie obtenidos a partir de la situación de éstos.

Este planteamiento es correcto cuando se trata de no-linealidades débiles, pero no es capaz de ajustarse a la realidad cuando se pasa al terreno de las fuertes. Y aquí se presenta el primer problema: ¿dónde está la línea de demarcación que separa a las débiles de las fuertes? Las simples

características de los elementos que componen el circuito no determinan esta separación. El factor que es, de hecho, el más importante es la forma en la que interaccionan estos elementos. Y esta forma se manifiesta a través de las ecuaciones que determinan su comportamiento, que en general será un conjunto de ecuaciones diferenciales acopladas.

El hecho más sorprendente se produce cuando se estudian circuitos muy sencillos, sin aparente complejidad, y en los que está presente algún componente no lineal con unas características totalmente conocidas y regulares. Lo que aparece a veces en ellos es un comportamiento que se designa como caótico pero que, en ocasiones, ha sido designado como ruido.

Como apunta M. J. Hasler ², sólo hay una forma de separar el ruido del caos. Y esta forma es el estudio de los tres conjuntos de resultados que pueden extraerse de un experimento. Estos conjuntos son los siguientes:

- a) resultados obtenidos de experiencias del laboratorio.
- b) simulaciones mediante ordenador, y
- c) razonamientos de tipo puramente matemático.

Cada uno de ellos, por separado, no proporciona pruebas suficientes de la existencia de caos. El primero porque puede ser simplemente ruido. El segundo porque puede surgir de la acumulación de errores, por ejemplo, de redondeo. Y, finalmente, el tercero, porque puede ser que no se ajuste por completo a todos los parámetros que están presentes.

Desde el principio del estudio del caos en Electrónica, y dada la complejidad del problema, la mayor parte de los desarrollos se han realizado sobre circuitos que se ha intentado fueran lo más sencillos posibles. Para ponerlo en práctica se ha hecho uso, indirectamente, del teorema de Poincaré-Bendixson ^{3,4}, que llevándolo al caso de circuitos eléctricos, implica que podrá obtenerse caos en los dos casos siguientes:

- a) Circuitos con, al menos, dos elementos reactivos (condensadores y bobinas) y una fuente de tensión o intensidad dependiente del tiempo, o
- b) Circuitos con, al menos, tres elementos reactivos.

La mayor parte de las experiencias realizadas se han centrado en circuitos del primer tipo.

El ejemplo más clásico de los estudiados ha sido el del oscilador de Van der Pol, que fue planteado hacia 1927⁵ con unas técnicas que hoy nos resultarían absolutamente rudimentarias. De hecho merece que nos detengamos un momento en este hecho, porque supone una prueba de que, en ocasiones, la abundancia de medios y recursos no es una garantía de que los resultados vayan a ser absolutamente novedosos y originales. En concreto, lo realizado por Van der Pol es prueba de lo contrario.

Cuando hoy nos imaginamos cualquier laboratorio de Electrónica, una de las herramientas que más indispensables nos parecen es el osciloscopio. Resulta totalmente impensable el más elemental análisis de señales sin que podamos ver a éstas en la pantalla de un osciloscopio. En cambio, cuando Van der Pol realizó sus experiencias, el osciloscopio no existía. Y la única forma que tuvo para poder intuir que algo raro pasaba en su circuito fue la de estudiar el comportamiento de la señal de salida por medio de un auricular telefónico con el que, a oído, analizaba las variaciones de frecuencia. Trabajar así sería hoy ilusorio y exigírselo a alguien una locura. Pero en ciertas ocasiones, una sofisticada instrumentación no lo es todo. Y, al contrario, sin unos muy potentes equipos es posible obtener, a veces, resultados originales.

El esquema simplificado del circuito de Van der Pol es el que puede verse en la Fig. 1. Como se aprecia está compuesto por un simple triodo, en una configuración osciladora. Su objetivo era el de obtener las señales sinusoidales necesarias para la modulación requerida en una transmisión de radio. Según variaba la intensidad que pasaba por el triodo, Van der Pol notaba como el tono que oía iba cambiando de una frecuencia a otra de manera discreta. Pero, de vez en cuando, notaba algo extraño. El comportamiento le sonaba irregular en una forma que era incapaz de explicar. En el artículo que envió a «*Nature*»⁵ indicaba que *«de vez cuando, se oía una especie de ruido en el auricular del teléfono, antes de que la frecuencia pasase al siguiente valor»*. Pero no lo tomó en consideración preocupándose

tan sólo de la parte regular del fenómeno. El caos estaba presente pero no lo había considerado.

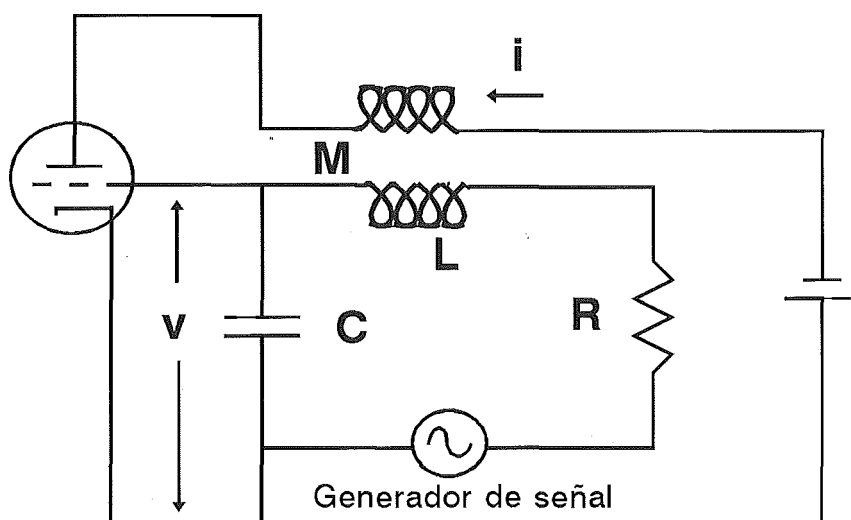


FIGURA 1. Esquema del oscilador de Van der Pol (1927)

Como tampoco había sido considerado hacia 1945, en un libro de entrenamiento para técnicos en Electrónica de la Marina de USA. En una especie de práctica, que fue luego recordada por R. Landauer, de IBM, en 1977 ⁶, se planteaba un sencillo circuito compuesto por lámparas de neón acopladas en la forma que aparece en la Fig. 2. Cada uno de los circuitos de que está compuesto, cuando está aislado, proporciona las clásicas oscilaciones de relajación conocidas por todos. Pero cuando se acoplan en la forma indicada, los dos circuitos pueden ofrecer comportamientos que van desde situaciones estacionarias hasta caóticas, pasando por regiones de oscilación. La forma de verlo, igual que antes, no tenía por que ser mediante osciloscopio, ya que mediante los destellos que proporcionaban las lámparas de neón era posible seguir el proceso que se iba produciendo.

Todo lo anterior quiere decir que, desde muchos años atrás, se han estado observando fenómenos que hoy podemos catalogar como caóticos pero que han sido ignorados

e, incluso, tratados de olvidar por alejarse de las pautas convencionales.

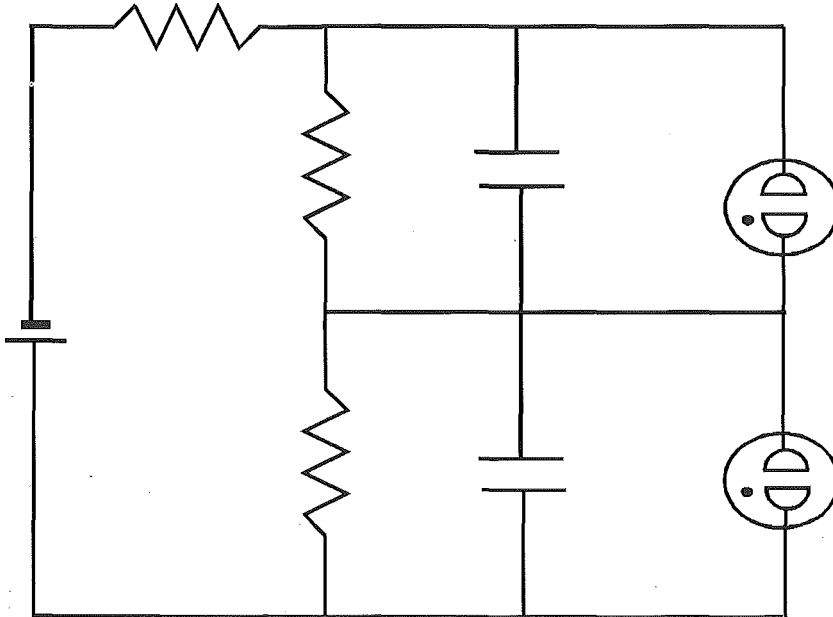


FIGURA 2. Circuito para la obtención de comportamiento caótico con dos lámparas de neón.

Aunque sólo a modo de ejemplo, y sin pretender seguir adelante con este tema, sí creemos que resulta interesante plantear la ecuación del oscilador de Van der Pol, que es también la del de la Fig. 2. Y es interesante plantearla porque es común con muchos otros tipos de fenómenos encontrados en campos muy alejados de los circuitos electrónicos, como pueden ser los péndulos sometidos a otras fuerzas externas además de la gravedad. Esta ecuación es

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \epsilon (1-x^2) \frac{dx}{dt} + x = 0$$

siendo x el voltaje, adimensional, en la inductancia del circuito resonante y el parámetro ϵ está relacionado con las propiedades del triodo y el circuito resonante. De acuerdo

con los valores que pueda adoptar esta ϵ el circuito se comportará de una manera u otra.

Sin entrar más de lleno en el estudio de esta ecuación o de este caso en concreto, ya que nos alejaríamos del objeto de estas páginas, sí queremos incidir sobre algunos hechos que están alrededor de todo ello.

Y lo primero que es preciso señalar es el de que, como en los casos conocidos de introducción a la Teoría del Caos mediante el estudio de poblaciones que siguen una cierta ley, lo que sucede en el circuito no es indiferente de los valores que adopten algunos de sus parámetros. En concreto, en este caso, y en fecha tan temprana como en 1945, Cartwright y Littlewood ⁷ encontraron que, para valores pequeños de ϵ , aparecían soluciones que denominaron «malas». Basándose en este resultado, en el año 1967, Smale ⁸ derivó su famoso ejemplo de la «herradura de caballo», que es uno de los prototipos de comportamiento caótico. En un caso similar al presentado aquí, Parker y Chua mostraron ⁹, mediante simulaciones de ordenador, que podían obtenerse soluciones periódicas estables y todas ellas con períodos que eran múltiplos impares de $2\pi/\omega$. No pudieron obtener, por el contrario, soluciones caóticas. La razón de ello se debía a que, según había mostrado Levi matemáticamente, en 1981 ¹⁰, este tipo de soluciones constituían un conjunto de dimensión nula. No podían, como resulta evidente, obtenerse en el laboratorio y para ser simuladas por ordenador era preciso disponer de algoritmos especiales que las pudieran calcular numéricamente.

No seguiremos más en este terreno, ya que las aportaciones que han aparecido en los últimos años son muy numerosas y, en parte, se salen de la idea que aquí deseamos presentar. Únicamente queda resaltar el hecho de que, en primer lugar, no debe jamás menospreciarse la aparición de fenómenos «extraños», porque de ellos pueden resultar consecuencias importantes. Y, segundo, que todas las técnicas son útiles para conseguir un fin, desde las experimentales de laboratorio a las teóricas, pasando por las modelizaciones por ordenador. Su conjunto es el que, de hecho, dará la luz a cualquier tema.

2.2. *Comportamientos caóticos en sistemas fotónicos*

Aunque podría repetirse aquí una historia equivalente a la planteada para los electrónicos, dada la gran semejanza que existe entre unos y otros, nos vamos a limitar a un simple planteamiento de su evolución, ya que éste es el objetivo del presente artículo.

Un comportamiento complejo fue detectado, casi desde su nacimiento, en la salida de un oscilador láser. El haz obtenido mostraba, bajo ciertas condiciones, una serie de irregularidades temporales que no eran las esperadas de un oscilador óptico con comportamiento regular. Durante bastantes años estas irregularidades fueron dejadas a un lado y sólo a partir del final de la década de los setenta comenzaron a ser tenidas en cuenta. Fue entonces cuando se descubrió que gran parte del comportamiento obtenido era similar al que un poco antes se había logrado en circuitos electrónicos. En poco más de tres años, gracias a esa similitud, se obtuvieron bifurcaciones y salidas reconocidas como caóticas. La sensación de estar recorriendo un camino ya conocido, aunque completamente nuevo, era común a todos los que transitaban por él. Lo que, hasta entonces, se había considerado como simple ruido pasó a ser algo más concreto, que ya se sabía de dónde procedía. Lo obtenido en otros campos sirvió para avanzar mucho más rápido que si se hubiera hecho partiendo de la nada.

Del láser se pasó a otros dispositivos fotónicos, encontrándose situaciones similares desde en mezclas de gases hasta en cristales líquidos ¹¹. Y si el camino para encontrar tan sólo la justificación de un comportamiento tenía sentido, mucho más lo pasó a tener el intentar aprovechar ese comportamiento para obtener resultados nuevos en problemas y aplicaciones que aún no habían tenido respuesta. Propuestas como la de aprovechar la aparición de una propiedad diferente a la esperada para la creación de estructuras en cierta forma autónomas han empezado a surgir y, con toda seguridad, en un próximo futuro, verán una realidad concreta ¹².

Queda así, como consecuencia de todo lo anterior, el hecho cierto de que la fertilización cruzada de dos campos, la Electrónica y la Fotónica, ha dado unos resultados que,

por sí solos, habrían tardado bastante más en ser obtenidos. Veamos qué se puede esperar en otros terrenos mucho más alejados que estos dos, como pueden ser los relacionados directamente con el hombre. Si la Electrónica y la Fotónica podían incluirse dentro del primer grupo de objetivos de la Ciencia que vimos en el apartado inicial, los que vamos a ver ahora podrán incluirse en el segundo.

III. Complejidad y caos en ciencias de la vida

3.1. *Ritmos cardíacos caóticos*

El concepto de ritmo caótico en el corazón fue planteado mucho antes de que este concepto adquiriera realidad en Física. En el año 1946, por ejemplo, L. N. Katz plantea, en su libro *«Electrocardiology»*¹³, el hecho de que *«debe designarse como acción caótica del corazón a todo comportamiento irregular en el mismo, que puede ser causado por sístoles prematuras frecuentes, con puntos de orígenes múltiples»*. Como es lógico, su planteamiento es mucho más descriptivo que cuantitativo y no llega a dar, en ningún momento, un análisis detallado de los mecanismos que lleva asociados.

La situación actual es bastante diferente a la de entonces. En los últimos años ha aparecido un gran número de estudios que han aunado los conceptos planteados en Física y Matemáticas con experimentos realizados sobre diferentes tipos de situaciones cardíacas. En concreto, muchos de ellos se han centrado en las respuestas obtenidas en corazones de varios animales al ser estimulados eléctricamente de manera periódica. Se ha obtenido, en general, un comportamiento irregular que puede ser interpretado, con bastante facilidad, mediante la conocida teoría de las bifurcaciones. De la comparación, y la en ocasiones semejanza, entre estos resultados experimentales y muchos de los ritmos anormales observados en electrocardiología clínica, puede inferirse que algunos de los «ritmos caóticos», que están asociados a la terminología médica más clásica y convencional, y el «caos» determinista de los modelos físicos pueden, en prin-

cipio, responder a análogos conceptos. En concreto, las arritmias o disrritmias que se encuentran en el análisis temporal y morfológico de las ondas de los electrocardiogramas (ECG), parece son consecuencia de focos múltiples, o ectópicos, localizados en diferentes regiones del corazón. Las interacciones entre las actividades eléctricas originadas en dichos focos conduce a contracciones ventriculares bastante complejas e irregulares. Un registro de ECG con arritmias ventriculares presentando extrasístoles múltiples, y que pueden ser derivadas posiblemente de focos múltiples, suele ser obtenido muy a menudo antes de una muerte instantánea.

El modelo teórico que podría relacionar un mecanismo realmente caótico para el corazón, con la teoría matemática del caos no ha sido planteado aún en su totalidad. Sí lo están, en cambio, modelos muy simplificados, como por ejemplo el de Glass et al ¹⁴, que consiste en un estimulador eléctrico acoplado unidireccionalmente a un oscilador cardíaco independiente. Resulta altamente significativo, en este momento, apuntar el que una de las primeras modelizaciones que se hicieron de los ritmos cardíacos fue realizada por van der Pol y van der Mark, en 1928 ¹⁵. Van der Pol, recordémoslo, es el mismo autor del que partimos para el planteamiento del caos en circuitos electrónicos. En su trabajo propusieron la equivalencia de los ritmos del corazón con el comportamiento de un par de osciladores no lineales acoplados. Mediante variaciones de las frecuencias relativas de ambos osciladores era posible reproducir diferentes arritmias cardíacas. Dado que un análisis matemático de las ecuaciones que gobernaban al sistema es extremadamente complejo, la mayor parte de los investigadores que han seguido este camino lo han hecho mediante simulación por ordenador. De hecho, aun hoy, el análisis de las ecuaciones de van der Pol constituye objeto de estudio de la matemática no lineal.

Sin introducirnos más en este terreno, que es en sí mismo notoriamente complejo, sí parece procedente señalar algunas de las conclusiones más significativas que se han encontrado. Y entre ellas cabe mencionar los resultados que se obtienen cuando se introducen estímulos externos sobre el corazón. Estos estímulos suelen ser breves pulsos de corriente introducida a través de un microelectrodo in-

tracelular. El parámetro más significativo es la frecuencia de dicha corriente y su relación con el período de latido. Si es T_0 el intervalo intrínseco de tiempo transcurrido entre dos latidos, y que suele estar entre 0,5 y 1 segundo, los períodos de las señales externas se encuentran entre $T_0/3$ y $2T_0$. En ese margen pueden encontrarse la mayor parte de las respuestas que son características de una ruta al caos, y entre las que pueden señalarse *intermitencias*, *duplicación del período* y *cuasiperiodicidad*. La segunda, como ya es sabido, constituye uno de los inicios de la ruta que conduce al caos. Las otras dos son otros tipos de comportamientos irregulares que forman parte, también, de una larga serie de indicios que conducen a la misma meta.

3.2. *Evolución de patrones de esquizofrenia*

De análoga manera a como la Mecánica determinista de Newton se encontró en un callejón sin salida al tratar de explicar algunos fenómenos, la búsqueda de la causa final responsable de la patogénesis de la esquizofrenia ha sido en vano. Todos los modelos lineales de su etiología han sido abandonados prácticamente e, incluso, los que planteaban estrategias multifactoriales están fuera ya de cualquier línea de investigación. En 1986, L. Ciompi planteó ya el que «*había necesidad de establecer modelos que se centraran en las interacciones entre los aspectos biológicos y psicosociales, intrapsíquicos e interpersonales, cognitivos y afectivos, así como en los síntomas psicológicos positivos y negativos de la esquizofrenia*»¹⁶.

En cualquier caso, el planteamiento del estado esquizofrénico ofrece uno de los campos más claros en los que la presencia de un número muy elevado de factores hace imposible el intentar resolverle por métodos convencionales. Es preciso, en primer lugar, identificar de manera exacta las variables biológicas y psicosociales que intervienen. En segundo, y éste es quizás el que podría encuadrarse dentro de un entorno más físico, la descripción precisa de las interacciones y las realimentaciones entre dichas variables o conjuntos de ellas. Y finalmente, pasar a un nivel por

encima del fenomenológico de descripción de sus fases, con el fin de caracterizar la dinámica que las gobierna.

El primer punto de los tres arriba mencionados es de carácter metodológico y, en principio, presenta un menor grado de indeterminación. Pero los otros dos, y más en concreto el segundo, necesitan una cuantificación y, posiblemente, una simulación. Los modelos presentados hasta hoy, y aquí empezamos ya a entrar de lleno en zonas de conexión con el tema del presente trabajo, están en algunos casos basados en otros empleados para la dinámica de poblaciones. En este caso, como parece evidente, el sistema que ha de ser planteado tiene que ser, por fuerza, más complejo ya que implica dos modelizaciones simultáneas: la de la psicología humana, que no es sino un sistema bio-psico-social, y la simulación de esta psicología por medio de la herramienta que se vaya a emplear, normalmente un ordenador. Las relaciones que pueden plantearse así quedan de manifiesto en el esquema planteado por Zinterhof ¹⁷, en 1987, y que aparece en la Fig. 3.

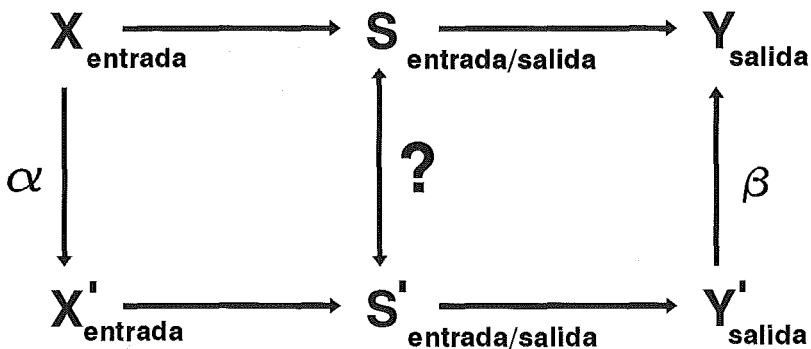


FIGURA 3. Relaciones entre los factores reales presentes en la esquizofrenia y su modelización.

La relación aparece entre dos triplete de variables, (X,Y,S) y (X',Y',S') , donde X se corresponde con las entradas a la psique del sistema real y X' es la correspondiente a la simulación. Y e Y' son las respuestas, mientras que S y S'

representan las relaciones entrada/salida. La única relación posible conocida entre el triplete superior y el inferior es a través de las condiciones de entrada y salida, α y β . El problema es la correlación entre S y S' que sólo es posible hacerla por medio de modelos que pueden consistir en un conjunto de ecuaciones diferenciales o en estructuras tipo autómatas celulares. En cualquier caso, la mayor parte de los enfoques se reducen, al final, a un conjunto de funciones matemáticas no demasiado complejas.

Yendo, de nuevo, al caso de la esquizofrenia la situación real que se tiene a la salida de un caso concreto, es un registro clínico con una estructura de variación temporal, compleja. En el registro se sitúa en el eje de abscisas el tiempo y en el de ordenadas las fluctuaciones que aparecen con respecto a una determinada situación que pudiera denominarse de «normalidad». Usualmente se llevan al eje de ordenadas positivo las etapas psicóticas de la enfermedad y al negativo la no psicóticas. El eje de abscisas sería como la línea de paso de no-enfermedad a enfermedad. Los siete niveles que suelen adoptarse son:

- | | |
|---------------|---------------------------------------|
| | 7. Alucinaciones y estado catatónico. |
| psicóticos | 6. Ilusiones y espejismos mentales. |
| | 5. Despersonalización e irrealismo. |
| | 4. Confusión, desorientación. |
| | 3. Fuerte aislamiento o agresividad. |
| no-psicóticos | 2. Estado de ansiedad, nerviosismo. |
| | 1. Situación de equilibrio. |

El registro normal de un paciente mostraría una evolución totalmente irregular y en la que sería imposible, en un principio, predecir la evolución exacta que va a seguir en el futuro. O dicho de otra manera, sería imposible predecir la evolución de la enfermedad. Y esto se produce tanto en series temporales largas, de hasta treinta años, como en observaciones tomadas en un único día. Lo interesante de todas ellas es que son por completo análogas a las que aparecen en campos tan dispares como: Física, en las inestabilidades de Bénard; Química, en la reacción de Belousov-Zabotinski; Matemáticas, en los conjuntos de Cantor o de

Julia; Biología o, finalmente, Meteorología. Su conjunto plantea una serie de hechos en común, entre los que pueden señalarse los siguientes:

- a) Están gobernados por leyes dinámicas muy sencillas,
- b) Muestran comportamientos totalmente irregulares, y
- c) Su evolución temporal es imposible de predecir.

Además de ello, puede añadirse que la dinámica de estos procesos viene regida, en general, por un conjunto de ecuaciones diferenciales acopladas, cuyas variables definen el denominado «*espacio de fases*». En ciertas ocasiones, hay zonas de dicho espacio en el que las soluciones convergen y permanecen allí, mientras no aparezca ninguna perturbación adicional. Estas zonas se conocen con el nombre de «*atractores*» y caracterizan a aquellos sistemas que tienen comportamientos como los indicados. Estos atractores se caracterizan por sus dimensiones de *fractal*, que es una propiedad geométrica, y por el exponente de Liapunov y la entropía de Kolmogorov, que ya son propiedades dinámicas.

De todo ello ha surgido la idea de que pudiera ser posible que los modelos planteados para los anteriores casos, y que se suelen englobar en la denominada teoría de la Complejidad, puedan ser válidos para el estudio de la esquizofrenia. Este tema, como puede comprenderse fácilmente, es aquí bastante más complejo que en los casos mencionados, por las razones que se apuntaron anteriormente.

Los factores que inciden sobre la esquizofrenia son muy variados y proceden de un gran número de campos, totalmente dispares. Si el estudio, por ejemplo, de la evolución de las condiciones climáticas es un caso claro de problema con muy difícil solución, éste lo es mucho más. Si en Climatología, la mayor parte de las variables que aparecen pueden englobarse dentro de entornos estudiados, con mayor o menor conocimiento, por distintas ramas de una única área de la Ciencia, que es la Física, aquí, en cambio, la situación es muy otra. La incidencia sobre el presente problema viene, como se ha apuntado antes, del entorno bio-psico-social del individuo. Y el control del mismo es prácticamente imposible.

En cualquier caso, ya se han iniciado una serie de estu-

dios que, al menos, plantean un método que se basa en las mismas técnicas que se aplican en Teoría de la Complejidad. Así, por ejemplo, L. Ciompi ha planteado ¹⁶ la posibilidad de describir la dinámica irregular de su evolución, en términos de teoría de sistemas dinámicos o, lo que es igual, de teoría del Caos. Mediante el análisis de una serie temporal, como la que se mencionó antes, mostró la existencia de un atractor extraño.

En el trabajo de Ciompi, con los datos obtenidos de un paciente al que siguió en su evolución durante 760 días, se llega a determinar la existencia de un atractor caótico en el desarrollo de la esquizofrenia ya que, por ejemplo, la representación en el diagrama de fases muestra que los puntos que se obtienen no le cubren por completo, como sería el caso de una situación estocástica, sino que se encuentran concentrados en torno a unas ciertas regiones y con una determinada estructura. Hechos como los anteriores pueden repetirse con otros estudios realizados por investigadores de este campo. De todos ellos se infiere la aparición de comportamientos marcados por fluctuaciones, oscilaciones regulares o amortiguadas y dinámica caótica.

Como resulta evidente, aunque parezca más o menos clara la existencia de un comportamiento del tipo que aquí estamos viendo, esto no quiere decir que con ello se hayan determinado los orígenes de la esquizofrenia. Simplemente se dispone de una serie de hechos que evolucionan de una manera conocida. Pero se ignora por completo cuál es la procedencia de los mismos y la raíz de su aparición. O más aún, se desconoce, al menos por el momento, cuáles son las posibles formas de las ecuaciones que engloban los parámetros que intervienen.

La situación sería así equivalente, por ejemplo, a la que se tenía en el Renacimiento con respecto al movimiento de los cuerpos. Se conocía la trayectoria de un proyectil al ser lanzado por un cañón, pero se ignoraban las ecuaciones que determinaban su movimiento parabólico. Faltaba algún tiempo para que se llegase a la solución completa del problema. Pero, mientras tanto, los artilleros tenían base suficiente como para lanzar sus granadas. De análoga manera, con los datos acerca de la esquizofrenia que se tienen, no se dispone de base para determinar las leyes de su dinámica.

Pero sí se dispone, en cambio, de una base para definir las clases de prognosis para su desarrollo.

IV. Conclusiones

Los casos presentados en los apartados anteriores no son sino tan sólo una mínima parte de los que pueden verse en la literatura del tema. La razón de haber sacado a la luz éstos, se deriva del intento de mostrar que áreas en principio por completo dispares pueden tener raíces comunes. Y que el estudio de una de ellas puede conducir a resolver los problemas de otras. El transvase de resultados puede ser más fructífero que el estudio intensivo de una única área.

Quizás el único problema que se presenta es el derivado de que no todas las ramas de la Ciencia se encuentran en el mismo grado de concreción. Y con esto nos queremos referir al hecho de que si en unas es inmediata la cuantificación, en otras no lo es tanto. Si en Electrónica es fácil medir ⁽¹⁸⁻¹⁹⁾, porque hay un conjunto de magnitudes perfectamente definidas y una serie de equipos que lo pueden hacer sin dificultad, en Psiquiatría, por ejemplo, es casi imposible. Cualquier tipo de indicación que se pueda hacer sobre el estado de un paciente, y más si se trata de un problema psíquico, no puede basarse más que en apreciaciones subjetivas, bien del observador o del propio paciente. Dar un número para, por ejemplo, indicar la situación de dolor de alguien es por completo ilusorio. Como puede ser darlo para un estado de ansiedad o de alucinación. Hasta que no se determine un método que permita hacerlo de una manera absoluta, todo lo que intente hacer serán meras aproximaciones de la realidad. Pero, en cualquier caso, la aproximación debe hacerse.

Bibliografía

¹ MARTÍN PEREDA, J. A. y GONZÁLEZ MARCOS, Ana: Repercusiones de la Teoría del Caos sobre los planteamientos de la Ciencia y la Tecnología: ¿Interdisciplinariedad o Especialización?. *Arbor*, vol. CXLV, 571 (Julio 1993), pp. 107-120.

- ² HASLER, M. J.: «Electrical Circuits with Chaotic Behavior». *Proceedings of the IEEE*, vol. 75, 8, 1.009-1.021, 1987.
- ³ POINCARÉ, H.: «Memoires sur les courbes définies par les équations différentielles». I-IV, *Oeuvre I*, Gauthier-Villas, París, 1880-90.
- ⁴ BENDIXSON, I.: «Sur les corbes définies par les équations différentielles». *Acta Math*, 24, 1-88, 1901.
- ⁵ VAN DER POL, B., y VAN DER MARK, J.: «Frequency Demultiplication». *Nature*, 120, 363-364, 1927.
- ⁶ LANDAUER, R.: «Poor Man's Chaos». *Internal Memo IBM Corp.* 1977.
- ⁷ CARTWRIGHT, M. L. y LITTLEWOOD, J. E.: «On non-linear differential equation of the second order: I. The equation $y-K(1-y^2)y-y=bl\dot{t}-\alpha$, K large». *J. London Math Soc.*, 20, 180-189, 1945.
- ⁸ SMALE, S.: «Differentiable dynamical systems», *Bull. Amer. Math. Soc.* 73, 747-817, 1967.
- ⁹ PARKER, T. S. y CHUA, L. O.: «A computer-assisted study of forced relaxation oscillations», *IEEE Trans. Circuits Syst.* CAS-30, 518-533, 1983.
- ¹⁰ LEVI, M.: «Qualitative analysis of the periodically forced relaxation oscillations», *Mem. Amer. Math. Soc.*, 32, 244, 1981.
- ¹¹ MARTÍN-PEREDA, J. A. y MURIEL, M. A.: «Self-Beating Instabilities in Bistable Devices» y «Empirical and Analytical Study of Instabilities in Hybrid Optical Bistable Systems». En «*Optical Bistability 2*». Eds. C. M. Bowden, H. M. Gibbs y S. L. McCall, pp. 135-151, Plenum Press. N. Y. 1984.
- ¹² NICOLIS, G. y PRIGOGINE, I.: «Exploring Complexity», pp. 138-141, W. H. Freeman and C. N. Y., 1989.
- ¹³ KATZ, L. N.: «Electrocardiology», 2nd, edn. Lea and Febiger, Philadelphia, 1946.
- ¹⁴ GLASS, L., SHRIER, A. y BÉLAIR, J.: «Chaotic Cardiac Rhythms». En «Chaos». Ed. A. V. Holden, pp. 236-256. Manchester Univ. Press., Manchester, 1987.
- ¹⁵ VAN DER POL, B. y VAN DER MARK, J.: «The heart bear considered as a relaxation oscillator and an electrical model of the heart». *Phil. Mag.* 6, 763-75. 1928.
- ¹⁶ CIOMPI, L.: «Synergetics in Psychiatry-Simulation of evolutionary Patterns of schizophrenia on the basis of Nonlinear Difference Equations». En «*Self-Organization and Clinical Psychology*». Eds.: W. Tschacher, G. Schiepek & E. J. Brunner, Berlín, 1992, pp. 195-203.
- ¹⁷ ZINTERHOF, P.: «Mathematische Systemtheorie». En «*Sozialwissenschaftliche Methodem*». Ed. E. Roth, München, 1987, pp. 105-121.
- ¹⁸ MARTÍN-PEREDA, J. A. y GONZÁLEZ MARCOS, Ana: «Use of Feynman diagramans in large-scale neural networks with nonlinear behavior». En «Chaos in Biology and Medicine». SPIE'93. San Diego, Ca. USA, 12-13, Julio 1993.
- ¹⁹ GONZÁLEZ-MARCOS, Ana y MARTÍN-PEREDA, J. A.: «Quasi-chaotic digital behavior in an optically procesing element». En «Chaos in Communications». SPIE'93. San Diego, Ca. USA. 14-15 Julio, 1993.