

ORDEN Y DESORDEN EN EL BORDE DEL CAOS

Joaquín González Álvarez

Para desarrollar este tema de objetivo didáctico, necesitamos explicar el significado de algunos términos claves que en nuestro contexto se corresponden con conceptos de la termodinámica que no son los mismos de sus homónimos en el lenguaje corriente.

En primer lugar nos ocuparemos de los conceptos a los cuales se refieren tres vocablos que aparecen en el título, orden, desorden y caos. Por razones didácticas, comenzaremos por analizar conjuntamente los conceptos *orden* y *desorden* y para ello nos valdremos de las propiedades magnéticas presentadas por una barra de hierro que inicialmente no es un imán (esto es. Una barra de hierro virgen), pero que al someterla al campo magnético de un imán inductor, ésta (la barra virgen) se convertirá en un imán. Antes de su imantación la barra como todo cuerpo, está formada por átomos cuyos electrones (carga eléctrica negativa) se comportan como planetas girando al rededor del núcleo, y sabido es por Electromagnetismo que cargas eléctricas moviéndose generan campos magnéticos, y si es en órbitas cerradas, se comportan como imanes que en el caso de los átomos pueden imaginarse como pequeñas flechas (\uparrow) con la punta como un polo y la cola como el otro de estos átomos-imites. Cuando la barra no está imantada, como en todo cuerpo no imantado, están las flechas (los átomos imanes) orientadas en todas las direcciones posibles en ninguna de las cuales se observará una propiedad que la distinga de las demás, esto es, presentando *simetría* (concepto físico-matemático sumamente importante), decimos entonces que el sistema de átomos del hierro en la barra virgen está *desordenado* termodinámicamente. Cuando la barra se somete a un campo magnético inductor, las flechas (los átomos-imites) se alinearán en una misma dirección, habrá una dirección privilegiada, no habrá simetría en las direcciones, con esta *ruptura de simetría* (igualmente concepto muy importante), el campo magnético inducido se manifestará en una sola dirección y se dice entonces que el sistema está *ordenado* termodinámicamente.

La ruptura de simetría es un concepto con el cual está primordialmente relacionado un tema que acapara en estos momentos la atención de la comunidad científica, que no es otro que la espera de la detección por el centro de investigaciones CERN, del Bosón de Higgs, partícula portadora del Campo de Higgs (como el fotón es portador del campo electromagnético y los bosones W y Z lo son de la fuerza electrodébil) el cual en forma algo similar a como el antes visto campo inductor magnético, por ruptura de simetría dota de magnetismo a una barra virgen de hierro, así el Campo de Higgs dota de masa a algunas partículas elementales, por ruptura de simetría, como ocurre en el sistema de los bosones W y Z de la fuerza electrodébil.

Como veremos mas adelante en las transiciones de fase de segundo orden, en vez de ruptura de simetría, puede producirse *aumento de simetría*.

Volviendo al concepto de desorden diremos que *la naturaleza tiende espontáneamente al desorden*. La medida del desorden en términos científicos, se denomina *entropía* vocablo que refiere a uno de los mas importantes conceptos no sólo de las ciencias, sino del conocimiento en general. Se notará que utilizo con frecuencia el calificativo de "muy importante", pero es que "muy importante" es todo el tema que tratamos.

Con lo ya explicado estamos en condiciones de presentar la fundamental Segunda Ley de la Termodinámica, la cual puede enunciarse así: "En todo sistema aislado la entropía tiende espontáneamente a aumentar cuando no permanece constante". De que los sistemas tienden al aumento de entropía (al desorden), observamos evidencias constantemente, cuando una vasija con agua se vuelca, el agua se riega, se desordena, aumenta la entropía, nunca se ha visto al agua volver espontáneamente a la vasija. Cuando el sistema está desordenado completamente, esto es, cuando no hay acción alguna que impida el desorden, o sea cuando la *entropía es máxima se dice que el sistema está en **equilibrio termodinámico***. He aquí que en negrita hemos destacado un concepto fundamental que estará presente en casi todo lo que desarrollaremos en lo que sigue. Fijar que *equilibrio* en el contexto termodinámico es un concepto completamente antagónico a *orden*. En lo que sigue nos referiremos constantemente a sistemas *alejados del equilibrio*, refiriéndonos a situaciones en que el desorden (aumento de entropía). está impedido por acciones exteriores. Imaginemos un tubo de ensayo con un émbolo comprimiendo el aire que contiene, el aire comprimido es un sistema alejado del equilibrio, porque la acción del émbolo no le permite que la entropía aumente.

Lejos del equilibrio ocurren fenómenos peculiares de suma importancia que han sido estudiados por el Nóbel belga Ilya Prigogini, quien ganó el preciado galardón con el tema hoy convertido en disciplina, Termodinámica del No Equilibrio.

Una vez explicados los conceptos de orden y desorden, pasamos al tercero que aparece en el título, *caos*. No obstante ser la Teoría del Caos, un tema que comienza a tratarse a mediados del pasado siglo XX y la capital importancia del concepto de caos en esa teoría, cuyo significado no es el mismo que con el cual se le utiliza en el lenguaje corriente, ha sido empleado ampliamente por los medios de comunicación, la literatura de ficción, la televisión, el cine, etc. (sobre todo llamándole *efecto mariposa*), lo que ha permitido que el público llano maneje el término y tenga una idea de lo que significa.

La Teoría del Caos es una vertiente de otra mas general, la moderna Teoría de la Complejidad la cual estudia los llamados *sistemas complejos* que son aquellos colectivos que presentan propiedades que *emergen* al constituirse en sistema y que no presentan sus componentes aisladamente. Las células aisladamente no presentan las mismas propiedades que emergen al constituirse en tejido, de modo que los tejidos son sistemas complejos, sistemas donde se presenta el *emergentismo*. La mayor o menor complejidad de un sistema donde se presente el emergentismo, se mide por la longitud informática del programa de computación que lo describe.

Cualitativamente, puede describirse el caos como la situación que presentan los sistemas complejos sometidos a un proceso, cuando pequeñas variaciones de las condiciones iniciales producen grandes e imprevisibles variaciones en el desarrollo del proceso. Pero para presentar rigurosamente el concepto de caos se necesita tener en cuenta que éste es de índole matemático.

El caos se presenta en la expresión matemática que modela el proceso real al que está sometido un sistema, cuando los valores obtenidos por el modelo van presentando una regularidad predecible que puede ser una periodicidad, pero a partir de cierto valor de la variable independiente, se pierde la regularidad y la predicibilidad, se ha llegado al caos y a ese cierto valor que marcó su comienzo se le llama *límite o borde del caos*.

Como ejemplo matemático del caos, emplearemos el sistema complejo que se modela por el mapa iterativo:

$$X_{n+1} = rX_n(1-X_n) \quad (1)$$

Un mapa iterativo como (1) se emplea empezando con el valor para $X_n = X_1$ inicial, con lo cual se obtiene, X_2 , este valor obtenido se sustituye en (1) como el nuevo X_n y así sucesivamente tantas veces como se necesite.

El parámetro r en (1), depende de las condiciones externas del sistema y permanecerá constante en las iteraciones mientras no varíen las condiciones. Cuando se presente una nueva condición el parámetro será otro y así durante el proceso que se modela. Se presentarán momentos en el proceso, en los cuales se llega a valores de X_{n+1} que mientras no cambie r , se repetirán periódicamente, el sistema seguirá así *ordenado* y por lo tanto *lejos del equilibrio* como antes explicamos, para varios parámetros. Los parámetros r van aumentando en valor y en cada nuevo valor de r el número de valores que se repiten, llamados *atractores* serán el doble que en el anterior valor de r , denominándose esas variaciones, *bifurcaciones*, y a los correspondientes valores r_n , *puntos de bifurcación*.

En el ejemplo que nos ocupa el primer punto de bifurcación r_1 es igual a 2, y en este único caso al que por razones didácticas también llamamos de bifurcación, sólo hay un atractor.

Por las duplicaciones antes referidas para el segundo punto de bifurcación $r_2=3$, serán 2 los atractores, para $r_3=3.5$, serán 4. Hasta aquí se mantiene el orden, la lejanía del equilibrio pero para $r_4=4$, se pierde la periodicidad, se pierden la predicibilidad y el orden, se ha llegado al *caos determinista*, se le califica de determinista porque ya pasado el borde del caos, el desorden se convertirá en orden estabilizándose en un nuevo estado sujeto a determinismo matemático como pasamos a explicar. Ya pasado el borde del caos comienzan regularidades que se someten a un determinismo matemático genialmente encontrado por el físico Michael Feigenbaum al descubrir dos constantes, una entre los valores consecutivos de r :

$$\delta = \lim_{n \rightarrow \infty} (r_{n+1} - r_n) / (r_{n+2} - r_{n+1}) \approx 4.67$$

y otra entre dos distancias entre atractores de dos bifurcaciones consecutivas:

$$\alpha = \lim_{n \rightarrow \infty} d_{n+1} \approx 2.5$$

A este proceso de paso de un estado desorganizado a uno organizado en el borde del caos, con disminución de la entropía interna del sistema, (se preservará la Segunda Ley con un aumento de entropía en el exterior) se le conoce como *autoorganización*, el cual es fundamental en la ampliación a la teoría de la evolución de Darwin propuesta por el eminente biólogo teórico Stuart Kauffman.

A los procesos de transición de fase de sistemas en la lejanía del equilibrio se les llama *transiciones de segundo orden*, para distinguirlos de los de *transiciones de primer orden* que ocurren equilibradamente como las conocidas de liquefacción y ebullición.

Un ejemplo real de transición de fase de segundo orden es el de la transición de una sustancia ferromagnética a paramagnética. La sustancia ferromagnética debe su estado a que sus átomos-ímanes están ordenados en una misma dirección ordenación que evidencia lejanía del equilibrio, mientras que en una sustancia paramagnética esos átomos-ímanes están desordenados, en situación de caos. Si se calienta la sustancia ferromagnética se llegará a un valor crítico de temperatura, el borde del caos, desorden de los átomos-ímanes por lo cual la sustancia se estabilizará (después de pasar por el punto crítico) en una fase de paramagnetismo cuando sobrepase la temperatura crítica llamada punto de Curie, pasando por la desmagnetización completa en el mismo borde del caos. Como antes advertimos en las transiciones de fase de segundo orden como la de ferromagnetismo-paramagnetismo, puede ocurrir aumento de simetría, es obvio que el ferromagnetismo no presenta simetría, el campo magnético apunta en una sola dirección y en el paramagnetismo no hay una dirección privilegiada, hay simetría.

Hemos tratado en este artículo conceptos que revisten singular importancia en distintas disciplinas como física, química, biología teórica, economía, sociología y otras en las que procesos como el desorden, el caos conduciendo al orden desempeñan un rol fundamental, proceso que un exergo latino expresa en bella síntesis: ORDO ABS CHAO..

Joaquín González Álvarez

j.gonzalez.a@hotmail.com