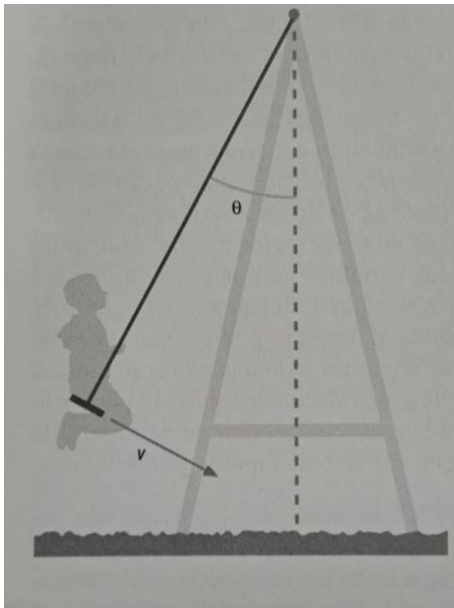
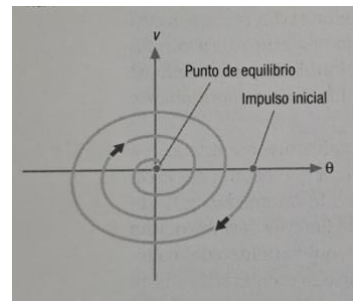


Sistemas Caóticos

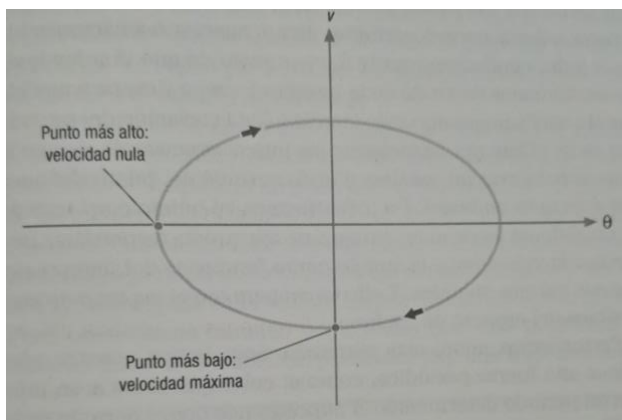
Un sistema disipativo que no esté alimentado por una fuente externa de energía tiende al equilibrio. Por ejemplo, un péndulo/amaca al que si se le da un impulso ira frenándose poco a poco, debido al rozamiento, hasta que termina parándose en el punto más bajo. Se puede describir su estado mediante su posición (con el ángulo θ) y su velocidad v (figura 1). Si se representa la trayectoria del péndulo en el espacio de fases, esto es, representar la posición en el eje de las abscisas y su velocidad en el eje de ordenadas, se obtiene la imagen de la figura 2.



La curva que describe el movimiento del péndulo tiende a un punto, que representa al péndulo (parado) en su posición de equilibrio. El péndulo es un sistema dinámico y el punto más bajo, su posición de equilibrio, se llama atractor pues, independientemente del impulso inicial del péndulo, todas las trayectorias acaban en su punto de equilibrio.



Si el péndulo no pierde energía, se balanceara hacia adelante y hacia atrás. Cuando el desplazamiento es máximo θ tiene un valor determinado por el desplazamiento inicial y su velocidad es cero. Luego la velocidad va aumentando (en sentido negativo) a medida que el ángulo disminuye. Cuando el ángulo se hace cero, la velocidad es máxima (de nuevo en sentido negativo). El ángulo cambia entonces de signo y la velocidad va disminuyendo (en valor absoluto). Cuando el péndulo se encuentra de nuevo en su separación máxima pero a la izquierda, la velocidad vuelve a cero y de nuevo empieza a acelerarse (Figura 3).



El diagrama de las variables ángulo y velocidad en el movimiento de ida y vuelta del péndulo viene representado por una elipse. El circuito cerrado nos dice que el movimiento es periódico y predecible. Si se cambia la amplitud, la imagen en el espacio de fases es similar, pero la elipse tiene diferente tamaño. Cada curva indica de forma única el estado completo del sistema y ese estado solo tiene un futuro. Entonces,

una vez que se haya definido el estado inicial, se determina el futuro. El movimiento del péndulo se puede analizar a partir de las Leyes de Newton. Pero el mismo Newton estaba al tanto de problemas que no se resolvían con sus ecuaciones, tan fácilmente. Particularmente el

problema de los tres cuerpos. Por lo tanto, calcular el movimiento de la Tierra alrededor del Sol fue bastante simple con solo esos dos cuerpos, pero agregar otro, por ejemplo la Luna, se volvió prácticamente imposible. El primero que vislumbró que también la Mecánica Clásica podía no ser tan determinista como se daba por cierto fue el gran matemático y físico Henri Poincaré. Encontró que había situaciones en las que no era posible dar una solución cerrada a las trayectorias de los planetas, es decir, no había una solución simple para el problema de los tres cuerpos. Además, vislumbró el primer ejemplo de **caos**.

El caos en realidad surgió en la década del 60, cuando el meteorólogo Edward Lorenz que adquirió en el Instituto Tecnológico de Massachusetts una sólida formación en meteorología dinámica, la que trata de entender la dinámica atmosférica a partir de ecuaciones que rigen los procesos atmosféricos, empezó a interesarse por la predicción numérica.

En esos primeros años de las computadoras, algunos meteorólogos se habían inclinado por utilizarlos con un enfoque estadístico, más parecido a la predicción sinóptica habitual: situaciones semejantes dan lugar a comportamiento semejantes. Los estadísticos utilizaban computadoras para manejar gran cantidad de datos y tratar de hacer pronósticos a partir del comportamiento pasado de la atmósfera.

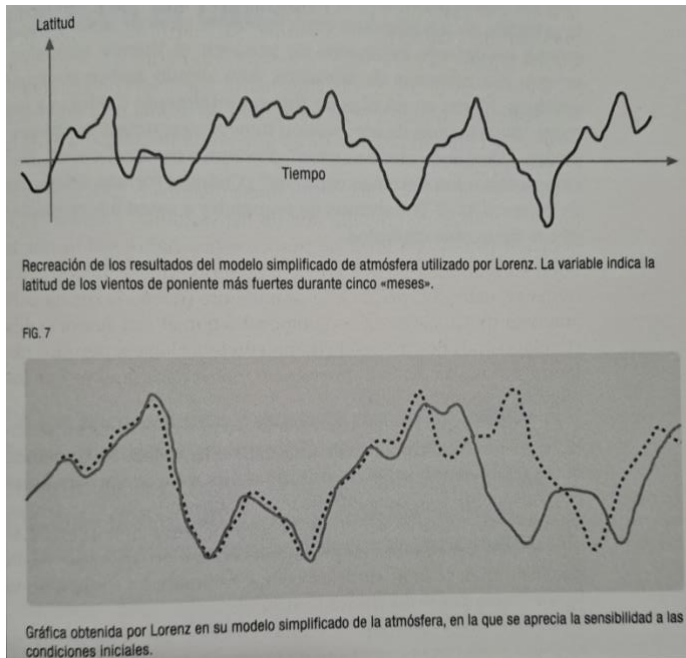
En torno a 1956 Lorenz ideó una forma de discernir si el enfoque estadístico y el dinámico podían ser equivalentes. Partiría de un sistema de ecuaciones simplificado, pero cuyas soluciones tuvieran suficiente variabilidad. Esta variabilidad era necesaria porque las soluciones estacionarias, periódicas o muy repetitivas son fácilmente predecibles. Y utilizaría un ordenador para resolver las ecuaciones y generar una solución numérica a tiempos suficientemente largos, que permitiera valorar la capacidad de predicción a medio y largo plazo. Tratando la solución como si fuera una colección de datos meteorológicos reales, Lorenz utilizaría procedimientos estadísticos estándar para predecir el comportamiento de la serie numérica, la secuencia de valores obtenidos. Si la predicción estadística se correspondía con la solución numérica verdadera, la validez del método estadístico quedaría establecida.

Lorenz ideó un sistema de doce ecuaciones con doce variables como la presión, la temperatura, la humedad, que constituirían una especie de atmósfera artificial: había calentamiento solar, ciclones, anticiclones, vientos del este y del oeste, y poco más. Consiguió un rango de parámetros en los que su atmósfera mostraba el comportamiento esperado. La figura muestra una recreación de cómo evolucionaba una de las variables de la atmósfera de Lorenz durante cinco meses. El comportamiento no es completamente periódico, ni completamente aleatorio.

Un día Lorenz decidió repetir algunos cálculos, con el fin de examinar con detalle una de las variables. Detuvo el ordenador, tecleó una línea de números que había salido por la impresora un rato antes y volvió a ponerlo en marcha. Se fue a tomar un café y volvió al cabo de una hora. Cuando regresó comprobó que el ordenador había simulado unos meses de tiempo meteorológico, pero los números que salían por la impresora no tenían nada que ver con los que había calculado antes.

Lo primero que le vino a la cabeza era que la computadora se había estropeado. Pero antes de llamar a técnicos repasó los números que habían estado saliendo por la impresora durante su

ausencia, enseguida se dio cuenta de que los nuevos valores repetían los anteriores al principio, pero pronto empezaban a diferir. Las diferencias aumentaban duplicándose cada cierto tiempo, hasta que las cifras, al final, diferían completamente. La figura 4 muestra lo que Lorenz observó.



Lorenz comprendió lo que había ocurrido: los números que él había tecleado en la computadora no eran los originales exactos. La máquina calculaba con seis cifras significativas, pero la impresora solo imprimía tres, para ahorrar espacio. Por lo tanto, los números introducidos diferían de los originales a partir de la cuarta cifra. Lorenz había descubierto la extrema sensibilidad a las condiciones iniciales, el rasgo más característico del caos determinista.

En la simulación atmosférica, Lorenz descubrió la sensibilidad a las condiciones iniciales de los sistemas caóticos: dos estados inicialmente muy próximos daban lugar, al cabo del tiempo, a situaciones muy diferentes.

En la actualidad los modelos numéricos son la herramienta básica con la que se realizan las predicciones meteorológicas. Estas son bastante fiables a dos o tres días, incluso una semana, pero los modelos son incapaces de proporcionar un pronóstico aceptable con más de diez días de antelación.

El sistema solar y la atmósfera son ejemplos de sistemas caóticos. Sin embargo, se puede predecir con precisión la posición de los planetas con cientos de años de anticipación, pero no se puede predecir el tiempo atmosférico con dos semanas de antelación. Aun siendo ambos sistemas caóticos, lo son en escalas de tiempo distintas. Los sistemas caóticos son predecibles durante un tiempo característico (τ) y luego “parecen volverse aleatorios”.

Efecto mariposa:

“El aleteo de una mariposa en Brasil, ¿origina un tornado en Texas?” ese era el título de una conferencia que Lorenz pronunció en 1972 durante una reunión de la Asociación Estadounidense de la Ciencia. Escogió ese título para explicar que resultaba improbable que una respuesta sea afirmativa. El efecto mariposa ha trascendido el mundo de la meteorología y de la ciencia para pasar a ser un lugar común y dar nombre o aparecer en películas, canciones o series de televisión. Lo que Lorenz quería plantear, en un ámbito puramente meteorológico, era hasta qué punto la sensibilidad a las condiciones iniciales de los sistemas caóticos dificulta la predicción meteorológica, y ese era el tema de su charla. Con el aleteo de la mariposa quería mostrar esa pequeña perturbación que puede hacer que de condiciones iniciales aparentemente iguales no lo sean en realidad. Si la atmósfera es extremadamente sensible a condiciones iniciales, la capacidad de predecir el tiempo será muy limitado.

Aunque una mariposa en Brasil no pueda provocar un tornado en Texas, el efecto mariposa ha quedado como metáfora de la sensibilidad a las condiciones iniciales, una característica que presentan en mayor o menor medida todos los sistemas caóticos. Los trabajos de Lorenz ilustran un comportamiento que Poincaré había predicho más de un siglo antes.