



Reporte de Lectura



Rodrigo Vega Vilchis

Sistemas Complejos

2 Octubre 2021

Resumen

El contenido del presente reporte escrito es sobre el video documental: “The secret life of Chaos (BBC)” <https://www.dailymotion.com/video/xv1j0n>, y del primer capítulo del Libro Complejity: “A guided Tour” de Melanie Mitchel

Primero comenzando este reporte externando mi asombro y emotividad al ir avanzando en las lecturas y el tiempo de video, su conocimiento me brinda una forma de ver al mundo y nuestro alrededor de una manera más sutil, ya que por donde miremos: siempre habrá complejidad. Y es que a lo largo de la carrera hemos estado trabajando meramente con puros sistemas deterministas modelados por ecuaciones constitutivas cuyas soluciones son analíticas. Es quizás con las materias de Física Cuántica donde ya podemos hablar en términos de probabilidad, pero al fin y al cabo las soluciones a las ecuaciones vistas en dichos cursos siguen siendo analíticas en general. La sutileza de los sistemas complejos es tratar de describir la naturaleza: sí, en términos de algunas ecuaciones pero con la restricción de ya no tener soluciones absolutas, sino más bien obtener aproximaciones por medio de soluciones numéricas, es por ello que las herramientas computacionales son de extrema utilidad en el estudio de los sistemas complejos.

Este curso no es mi primer acercamiento a los sistemas complejos, he tomado materias como: termodinámica del origen y evolución de la vida, en donde veíamos que con base en las estructuras disipativas en términos de variables termodinámicas fueron dando origen y evolución a la vida en nuestro planeta; ecuaciones diferenciales parciales en donde la ecuación de difusión se relacionaba con las ecuaciones del modelo de Turing para la formación de patrones etc. Mi curiosidad me llevó al punto de querer obtener herramientas computacionales para continuar su estudio, y he aquí mi presencia.

Mi opinión sobre el video es emotiva en varios aspectos, primero comenzando por el legado de Alan Turing que persiste hasta nuestros días en varios aspectos y todos tienen que ver con sistemas complejos; desde la evolución continua y exponencial de la computación hasta el continuo desarrollo de teorías con base en sus escritos de la Morfogénesis. Sus avances y descubrimientos junto con los de Boris Belousov, fueron pioneros en el avance de los sistemas complejos y teorías relacionadas como

la Teoría del Caos y la Teoría de Catástrofes. Sin embargo, es de suma vergüenza el daño que las ideologías circundantes pueden hacer al avance del conocimiento y la ciencia, sean de la bandera que sean, tenemos un claro ejemplo de que tanto en el mundo liberal y el socialista se cometieron desgracias que por un lado llevaron al suicidio de Alan Turing y por otro lado llevaron al abandono de un nuevo descubrimiento con la razón de ser “tabú”, es decir, por el miedo al cambio de paradigma como Thomas Kuhn diría.

Dejando los desfortunios hasta aquí, hablemos ahora de los descubrimientos clave que se estaban suscitando cuando ambos (Alan Turing y Boris Belousov) estaban activos en sus investigaciones, por un lado se presentaba la conjetura de que: cómo es posible de que un conjunto de células embrionarias fueran generando más células en función del tiempo y que todas ellas fueran organizándose de tal manera que se generara algún tipo de tejido o ser vivo; consigo también abría otra segunda conjetura, con base en la anterior, que tiene que ver con la formación de algunos patrones que se encuentran presentes en la naturaleza, ya sea en animales como las manchas de las vacas o zebras, hasta en las plantas con su distribución para aprovechar la mayor cantidad de luz posible. Según se explica, es algo que la teoría Darwineana no había considerado en su totalidad, dichas características de éstos seres vivos quedaban determinadas por el tipo de genética de cada uno, pero no existía un por qué de su formación. Alan Turing propuso un modelo matemático en términos de ecuaciones diferenciales parciales para poder modelar los bautizados *patrones de Turing*:

$$\begin{aligned}u_t &= \gamma f(u, v) + \Delta u \\v_t &= \gamma g(u, v) + d\Delta v\end{aligned}$$

donde γ es un parámetro positivo, f y g representan la cinética química de los morfógenos, d es la razón de los coeficientes de difusión de los mismos, y Δ es el operador de Laplace en dos dimensiones. Por otro lado, Boris Belousov en sus tiempos libres estaba tratando de explicar cómo es que los seres vivos absorben la glucosa para poder obtener la energía necesaria para la vida, en sus investigaciones llegó a la conclusión de una reacción química muy peculiar si no es que sorprendente, consistía en la mezcla de dos reactivos que con el paso del tiempo se podía apreciar como una reacción química oscilante, ¡en el tiempo! Este hito era considerado por la prensa científica “una aberración” por contradecir lo que se entendía por conservación de la energía, y es por ello que no se publicaron sus descubrimientos. Sin embargo, los trabajos de Turing y Belousov estaban relacionados y de no ser por el Telón de Acero, ambos pudieron haber colaborado para el entendimiento de estos nuevos fenómenos encontrados. En este caso, la característica que comparten ambos descubrimientos dentro del lenguaje de sistemas complejos es: *la autoorganización* de los elementos de un conjunto, en estructuras con un comportamiento colectivo complejo, pero ésta es sólo una de las características que poseen los sistemas complejos, exploremos otras.

Décadas más tarde, aún se seguía creyendo que la dinámica de las cosas en el universo (mientras no

fueran sistemas cuánticos o relativistas) seguían siendo puramente deterministas, nos acercamos a una época en la que el ser humano le dio por tratar de descubrir y cuantificar fenómenos naturales como el clima, poblaciones de animales entre otras cosas. En esta parte, aparecieron dos personajes quienes fueron Konrad Lorenz y Robert May, cada uno por separado quería cuantificar las interacciones de un conjunto de elementos e individuos para estimar una predicción. En el caso de Lorenz, quería predecir el tiempo meteorológico con base en ciertos parámetros y un ensamble de ecuaciones diferenciales lineales no acopladas

$$\dot{x} = a(y - x)$$

$$\dot{y} = x(b - z) - y$$

$$\dot{z} = xy - cz$$

el resultado fue un especie de atractor extraño que no era como tal el resultado esperado para Lorenz, sin embargo, el hito aparece cuando al intentar modificar las condiciones iniciales de manera sutil, la evolución de este atractor es completamente distinta a la que se había preconcebido, ¿cómo era esto posible? desde luego Lorenz tuvo que comunicar esto a la comunidad científica inmediatamente tras el siguiente congreso, en su charla: “*Predictibilidad, ¿El aleteo de una mariposa en Brasil hace aparecer un tornado en Texas?*”, con ello nace el llamado efecto mariposa y consigo la Teoría del Caos. Y es que después se dieron cuenta que la predictibilidad no es algo que se pueda tomar como una trivialidad, en cada sistema en donde exista una interacción entre dos (mínimo) o más elementos, es considerado un sistema caótico; por ejemplo la dinámica del péndulo doble o el análisis de población que Robert May haría unos años después. Y aquí hay que entender a la interacción como un vínculo entre los elementos del sistema en donde la dinámica de cada uno afecta al resto de elementos. En esta parte podemos distinguir otra característica de los sistemas complejos: son impredecibles.

Con estos sucesos históricos se estaba destronando a la teoría Newtoniana de una vez por todas como teoría regidora de todo lo que conocemos, sin duda el siglo XX ha sido una época de grandes cambios de paradigmas. En la siguiente parte de la sección del video hablemos de los patrones encontrados en la materia, algo de lo que ya vislumbrábamos con la morfogénesis de Newton. La humanidad estaba acostumbrada a tener formas exactas o números exactos de las estructuras que fabricaba, por su simpleza y belleza simétrica, pero ¿acaso en las asimetrías no podemos encontrar belleza? Benoît Mandelbrot es el siguiente personaje de quien hablaremos por la construcción computacional de los llamados *fractales*, éstos se definen como objetos geométricos cuya estructura básica, fragmentada o aparentemente irregular, se repite a diferentes escalas; en la naturaleza podemos encontrar muchas y distintas expresiones de patrones que cumplen esta característica. Quiere decir que la naturaleza, en su auto-organización, siempre converge a la formación de patrones que tienen la estructura de un fractal. Tan solo veamos como esta formada nuestra piel, la estructura de algunas plantas o manchas en algunos seres vivos. Entonces, los sistemas complejos comparten la formación de patrones por medio

de auto-organización, muchos de esos patrones pueden asociarse a fractales.

Por último, el descubrimiento de todos estos hitos importantes dio lugar a la formación de sistemas computacionales capaces de aprender a base de la introducción de nueva información; dentro de esta parte se encuentra algo que se encuentra implícita en las secciones anteriores y de la cual hablaré un poco más al respecto más adelante: *la evolución*, de los sistemas complejos es lo que los hace complejos, en otros términos es el tiempo el responsable de la existencia de los sistemas complejos.

Hasta aquí concluyo mi perspectiva del video. Sigamos con la opinión de la lectura del libro de Mitchell. La lectura comienza con la introducción de algunos sistemas complejos, y cada uno de ellos comparten ciertas características entre sí, a pesar de ser completamente ajenos. Primeramente nos introduce como es la organización de una colmena de hormigas, nos habla de como a pesar de ser seres vivos muy pequeños, en realidad pueden ser letales y arrasar todo lo encuentran a su paso. Es de amplio interés su observación y estudio por el comportamiento colectivo que presentan, a pesar de ser casi ciegas y poco inteligentes individualmente, en conjunto son capaces de edificar una colonia, de establecer roles sociales e incluso de hacer guerras con otras colmenas o seres vivos. La clave de sus grandes hazañas se encuentra en la comunicación que ellas presentan, mediante señales de antenas, para poder coordinarse y pasar a la acción. Pero de ¿dónde habra surgido dicha comunicación o adaptabilidad? la evolución en el tiempo les ha permitido adaptarse y/o aprender de las circunstancias para llegar a tal sofisticación colectiva.

El siguiente sistema que analiza la autora es el cerebro y hace una relación entre la colmena de hormigas y el cerebro, ya que a pesar de ser sistemas ajenos, ambos presentan cierta inteligencia en cuanto a su composición, además comparten la característica de poder comunicarse entre hormigas y entre neuronas; es algo de lo que comentaba anteriormente con la interacción entre elementos que en este caso está dada por la comunicación. La vía de comunicación de las neuronas es por medio de neurotransmisores mientras que para las hormigas será por medio de señales u hormonas.

Otro de los sistemas situados dentro del cuerpo humano es el sistema inmunológico, es impresionante la capacidad de comunicación de cada célula del sistema inmunológico para hacer que agentes invasores patógenos sean neutralizados. Existe una comunicación entre linfocitos, que secretan anticuerpos para identificar a los agentes invasores, y llamar a los macrófagos para neutralizarlos. La comunicación entre células B y células T para poder agilizar el proceso de identificación y crear células hijas con dicha información en su código genético, es simplemente impresionante la capacidad de los sistemas inmunes.

Algo que caracteriza a estos sistemas es que no necesariamente están liderados por algún comandante o algún elemento especial, aunque si puede haber jerarquías en cuanto al desempeño de roles y actividades, la parte crucial de la inteligencia de éstos sistemas es la capacidad de comunicación que tienen.

Al final menciona dos ejemplos más: La Economía con los mercados internacionales y la “World

Wide Web”, son sistemas muy similares a los anteriores, se componen de elementos que interaccionan dentro de su propio medio. Para la economía tenemos a los mercados y la gente en general quien consume, invierte o realiza alguna acción, contribuye a la evolución de la economía. Sin embargo, dicha evolución es impredecible como en los sistemas anteriores por que simplemente es imposible cuantificar una por una de las transacciones hechas y de su impacto con el mercado. Por otro lado la W.W.W. se compone de páginas web que se relacionan entre sí.

Mitchell define tres importantes aspectos que comparten los sistemas complejos:

1. **Comportamiento colectivo complejo:** Los elementos de los sistemas complejos únicamente siguen reglas simples sin ningún control central o líder, las interacciones de un gran numero de elementos es lo que hace impredecibles a estos sistemas.
2. **Procesamiento de señales e información:** La clave de los sistemas complejos esta dada en la interacción/comunicación de sus elementos entre sí. Usan señales e información para la evolución del comportamiento del conjunto.
3. **Adaptación:** Está íntimamente relacionada con la evolución en el tiempo de los sistemas. Éstos sistemas necesitan adaptarse para su propia supervivencia, y lo harán mediante el aprendizaje colectivo que vayan adquiriendo

Una vez definiendo a los sistemas complejos con base en éstas características, podemos condensarlo en el siguiente enunciado que detalla la autora: **Un sistema complejo es aquel que posee un gran número de componentes relacionados por medio de redes sin un control central, siguiendo reglas simples de operación que brindan al conjunto un comportamiento colectivo complejo con procesamiento de señales e información, y adaptación vía aprendizaje o evolución.**

Dada una posible definición ahora nos corresponde plantear la pregunta: ¿Qué tan complejo es un sistema complejo? esta pregunta motiva la idea de medida de la complejidad, ¿acaso esto tiene sentido? dichas preguntas no han sido respondidas aún, sin embargo existen algunas alternativas para poder medir dicha complejidad, aún así no son consideradas universales por el caracter complejo que presenta cada sistema (valga la redundancia). Esta rama de estudios es apenas una ciencia en formación y es por ello que aún no se tienen estas conclusiones, de hecho, la autora nos dice que no existe una sola ciencia de la complejidad o una sola teoría de la complejidad, existen varias vertientes e imagino que cada sistema complejo tendrá su propia manera de abordarse de acuerdo a sus condiciones, ya que existen dos tipos principales de sistemas complejos los *adaptativos* que son aquellos que se adaptan en función del tiempo y los *no adaptativos* que son aquellos que tienen un caracter más caótico y tienen la característica de estar fuera de equilibrio¹

¹¿Es correcto este planteamiento?

Referencias

- [1] MITCHELL, MELANIE, *Complexity: A guided Tour*, primera edición, Oxford, Estados Unidos de América, Nueva York, 2009.
- [2] <https://www.dailymotion.com/video/xv1j0n>