

Física estadística y redes sociales

Albert Díaz-Guilera

Universitat de Barcelona, España

Alex Arenas

Universitat Rovira i Virgili, España

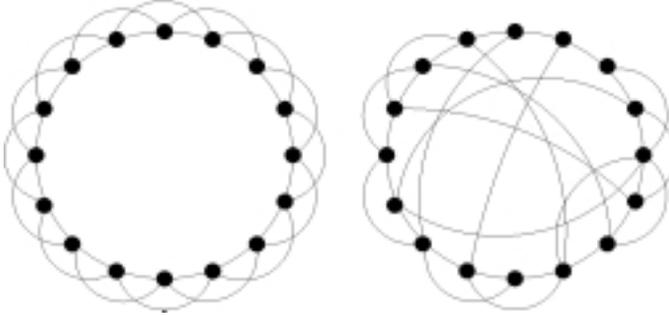
Roger Guimerà

Northwestern University, Estados Unidos

Cuando en el año 1967 Stanley Milgram publicaba su artículo “The small-world problem” en una revista de Psicología, nadie podía esperar que treinta años después tuviera una repercusión tan importante en campos tan aparentemente alejados como la física, la biología, las ciencias de la computación o las matemáticas, sólo por citar algunos de los campos alejados de las ciencias sociales. En el año 1998, Duncan Watts y Steven Strogatz, dos físicos-matemáticos aplicados (siempre es difícil la distinción entre estas dos especialidades) publicaron su trabajo “Collective dynamics of ‘small-world’ networks” en *Nature*, poniendo de manifiesto que la estructura topológica que subyace en ciertos sistemas tecnológicos, biológicos o sociales presenta unos rasgos comunes entre ellos. Las propiedades que ellos observaron es que dichas redes estaban altamente “clusterizadas” al igual que las redes regulares mientras que la distancia media entre cualquiera de las unidades que la forman es mucho más pequeña que en una red regular y muy cercana a una red completamente aleatoria, pero hay que recordar que en una red aleatoria la clusterización es muy baja debido precisamente a que no hay un grado de afinidad importante para establecer las conexiones. Y esas eran precisamente las redes que normalmente habían sido consideradas por los físicos para modelizar sistemas dinámicos complejos, o bien redes aleatorias o redes regulares. Introdujeron un modelo al que llamaron de “mundo pequeño”, precisamente por su analogía con el fenómeno del mundo pequeño introducido por Milgram.

La contribución más relevante de Watts y Strogatz fue la de introducir un modelo que se podía implementar muy fácilmente en un ordenador y que se muestra gráficamente en la figura siguiente:

FIGURA 1: Construcción de un mundo pequeño, según el modelo propuesto por Watts y Strogatz



En este modelo se parte de una red regular en una dimensión (un anillo) con un número constante de conexiones por nodo (cuatro en el caso que se muestra aquí) y se reemplazan algunas conexiones (con una determinada probabilidad p) por conexiones de largo alcance, lo que llamaríamos un atajo. Y en este tipo de modelos demostraron que algunas propiedades dinámicas estudiadas por físicos en las últimas décadas experimentaban una gran mejora dependiendo de la probabilidad p de reconexionado. Como ejemplos, tendríamos la sincronización de osciladores, la potencia computacional, o como efectos negativos la propagación de enfermedades. La evidencia empírica era que muchas de las redes que estaban documentadas en determinadas bases de datos (colaboración de actores, distribución de electricidad, red neuronal del gusano *C. elegans*) se podían catalogar dentro de este modelo, ya que participaban de sus dos propiedades básicas: distancia pequeña entre nodos y un alto grado de clusterización.

Pero no bastaba con este impulso inicial, cuando unos meses más tarde Albert-Laszlo Barabási y Reka Albert (1999) publicaron otro trabajo muy impactante en la comunidad: “Emergence of scaling in random networks” que apareció en *Science*. Algo que a Watts y Strogatz se les había pasado por alto y que Barabási y Albert detectaron era la distribución de conectividades. A partir de algunas de las grandes bases de datos que habían sido utilizadas anteriormente, además de la *World Wide Web*, dedujeron que la distribución de conectividades seguía una ley potencial, muy diferente de la esperada a partir del modelo anterior. Y ese concepto era el “scaling” del que se habla en el artículo, concepto muy familiar entre los físicos estadísticos, acostumbrados a tratar el escalamiento de diferentes magnitudes que aparecen en la naturaleza. Normalmente decimos que una determinada magnitud escala con una ley potencial en una variable sin preocuparnos de los prefactores numéricos ni otros detalles que pueden variar de material a material o de sistema a

sistema, lo que tienen en común es que todos “escalán” de la misma manera; y este concepto nos lleva de forma natural a otro muy utilizado en nuestro campo como es el de “universalidad”. Decimos que algunos sistemas pertenecen a la misma clase de universalidad cuando el conjunto de exponentes que definen las leyes de escala son los mismos, a pesar de tratarse de sistemas microscópicamente diferentes. El modelo que estos físicos propusieron para explicar sus observaciones experimentales tenía dos ingredientes básicos: crecimiento y enlace preferencial. Así, por una parte, tenemos una red a la cual se van añadiendo nodos y enlaces de tal forma que los enlaces van con mayor probabilidad a aquellos nodos que ya tienen una mayor conectividad, dando lugar a lo que en inglés se llamó “hubs” y que en algún texto en castellano se ha traducido como “cubos” (Barabási & Bonabeau, 2003).

A partir de ese momento la comunidad de físicos, y principalmente la comunidad de físicos estadísticos, se planteó una gran cantidad de problemas que podían estar relacionados con estos nuevos modelos:

- El estudio sistemático de grandes bases de datos de redes sociales (redes de colaboraciones científicas), biológicas (redes de cadenas tróficas), tecnológicas (Internet) o económicas (correlaciones entre valores bursátiles). Esto fue posible gracias a que una de estas redes, Internet, pone esas bases de datos al alcance de todo el mundo y la potencia de los ordenadores actuales hace el resto. Las características de mundo pequeño y las leyes de distribución potenciales empezaron a aparecer por doquier, dando lugar a diferentes clases de universalidad.
- Explotando la tendencia a la simplicidad de los físicos, con la modelización lo más sencilla posible de complejas estructuras topológicas que se encuentran en nuestro entorno inmediato, sean tanto sociales, como naturales, o tecnológicas. Modelos microscópicos que, aunque no sean tan próximos a la realidad como cabría esperar, predicen los resultados obtenidos experimentalmente. Aunque esta predicción sea vaga, en el sentido de que no se pretende explicar todos los detalles exactos del sistema en cuestión, sino entender cuales son los mecanismos básicos que dan lugar al comportamiento universal encontrado. En este sentido los primeros modelos, como el de Watts-Strogatz o el de Barabási-Albert no distinguían entre redes sociales, tecnológicas o biológicas, pero modelos introducidos posteriormente, de los cuales daremos detalles más adelante, sí lo hacían.
- Modelizando la evolución dinámica en redes complejas, ya que las nuevas topologías abrían nuevas expectativas a las dinámicas que se estudiaban normalmente o bien en redes regulares o en redes aleatorias, los dos casos extre-

mos donde, todo hay que decirlo, es más fácil obtener resultados analíticos. Uno de los ejemplos de aplicación más claros es el de la propagación de virus informáticos, problema que en una red compleja del tipo de las introducidas por Barabási y Albert, que a partir de ahora las llamaremos redes sin escalas, tiene la particularidad de que no es necesario que la probabilidad de infección alcance un valor umbral, necesario en redes regulares.

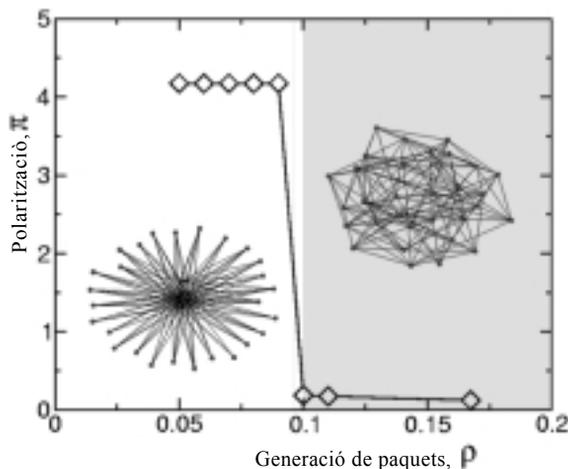
Particularicemos ahora a las contribuciones de los físicos estadísticos a las redes sociales. A parte de los pioneros en este campo ya citados anteriormente, posiblemente la persona que más haya contribuido a unir la física estadística con las redes sociales es Mark Newman, tanto en la parte de análisis sistemático de las redes sociales, introduciendo nuevos conceptos como la asortatividad o recuperando antiguos como la betweenness, como en la parte de modelado de las topologías sociales, introduciendo por ejemplo modelos jerárquicos, o como en la dinámica de la propagación de virus. El concepto de asortatividad (Newman, 2002), o correlación de conectividad, distingue a las redes sociales de las tecnológicas o biológicas. En las primeras los nodos más conectados tienen una tendencia a conectarse con otros nodos muy bien conectados, mientras que en las segundas la tendencia es la opuesta. Una de sus últimas publicaciones destaca por ser un artículo de revisión muy completo sobre la estructura y las funciones de las redes complejas (Newman, 2003).

Volvamos ahora al origen del problema, al mundo pequeño de Milgram. El resultado del experimento fue que las cartas enviadas a partir de los individuos elegidos al azar de diferentes localizaciones geográficas llegaron en un promedio de seis pasos, teniendo en cuenta que la información de la cual disponen cada uno de los individuos por los cuales pasa una carta tienen información puramente local. El primer intento de entender este problema de “buscabilidad” en una red compleja fue hecho por John Kleinberg en el año 2000, quien introdujo un modelo de red que era una combinación de red regular en dos dimensiones más un número de enlaces adicionales de largo alcance (atajos). Con un algoritmo de búsqueda puramente local, en el que los atajos no necesariamente acortan la distancia recorrida, demostró analíticamente que sólo se pueden encontrar caminos mínimos cuando la probabilidad de conexionado está relacionada de una cierta manera con la distancia geográfica entre los nodos. Posteriormente Watts, Newman y Dodds (2002) substituyeron la red regular por un conjunto de organizaciones jerárquicas. Otros trabajos en esta línea han explotado el hecho de que en las redes sin escalas muchos de los caminos más cortos pasan por los nodos más centrales, los “hubs”.

Pero el problema de la búsqueda en redes complejas, como el problema original de Milgram, lleva a situaciones más complicadas cuando admitimos que se pueden llevar a cabo un gran número de búsquedas simultáneas, éste es el problema de

la congestión que aparece en aquellos nodos más centrales por los cuales pasan un mayor número de búsquedas. Así, es fácil darse cuenta de que redes muy centralizadas que son buenas porque el proceso de búsqueda es muy fácil pueden devenir fácilmente congestionadas. Este es uno de los problemas que hemos estudiado en nuestro grupo en colaboración con Fernando Vega-Redondo y Antonio Cabrales, economistas de las Universidades de Alicante y Pompeu Fabra, respectivamente (Guimerá et al., 2002). Modelizamos una organización empresarial mediante una red compleja en la cual la dinámica viene dada por un flujo de problemas que se generan de manera aleatoria en un nodo de la red y necesitan ser resueltos por otro nodo también elegido de manera aleatoria. Con un conocimiento puramente local hemos buscado, con procedimientos muy familiares en la física estadística, dentro del espacio de redes asequibles aquellas redes que tienen un comportamiento óptimo, entendiendo por este óptimo aquellas que pueden resolver un mayor número de problemas sin quedar colapsadas. Hemos observado de nuevo un fenómeno que tiene un gran interés para la física, una transición entre una configuración óptima muy centralizada cuando el número de búsquedas es bajo a una configuración óptima muy homogénea, en el sentido de que todos los nodos juegan un papel muy parecido, cuando el número de búsquedas es alto (ver la Figura 2). En el desarrollo analítico que hemos introducido la magnitud característica de los nodos que tiene más importancia es la “betweenness” (Newman, 2001), concepto muy usado en las redes sociales como una de las medidas de la centralidad de los nodos individuales (Freeman, 1977).

FIGURA 2: Polarización (cociente entre la betweenness máxima y la media) en función del número de paquetes (o búsquedas).



Para acabar simplemente ofrecer al lector una serie de libros muy recientes, escritos o editados todos ellos por físicos donde se ofrece una visión muy variada de la diferente fenomenología asociada a las redes complejas en general y a las redes sociales en particular:

- D. J. Watts, *Small worlds* (Princeton University Press, Princeton, 1999). Libro divulgativo, básicamente sobre el modelo original de Watts y Strogatz.
- A.-L. Barabási, *Linked: the new science of networks* (Perseus, New York, 2002). Libro divulgativo, contando en primera persona la historia reciente de las redes complejas.
- M. Buchanan, *Nexus: small-worlds and the groundbreaking science science of networks* (Norton, New York, 2002). Libro también divulgativo, con un contenido muy parecido al anterior, pero contado por alguien que ha vivido la evolución como un espectador privilegiado.
- D. J. Watts, *Six degrees: the science of a connected age* (Norton, New York, 2003). También divulgativo, con un enfoque hacia las redes sociales.
- J.F.F. Mendes, S.N. Dorogovtsev, A.F. Ioffe, *Evolution of Networks: From Biological Nets to the Internet and WWW* (Oxford University Press, Oxford, 2003). Libro más técnico que los anteriores y requiere un nivel matemático elevado.
- S. Bornholdt y H.G. Schuster (Editores), *Handbook of Graphs and Networks: From the Genome to the Internet*, (Wiley-Vch, Berlin, 2003). Proceedings del congreso “*International Conference on Dynamical Networks in Complex Systems*” celebrado en Kiel en Julio de 2001.
- R. Pastor-Satorras, J.M. Rubí y A. Díaz-Guilera (Editores), *Statistical Mechanics of Complex Networks* (Springer, Berlin, 2003). Proceedings del congreso “*Statistical Mechanics of Complex Networks*”, celebrado en Sitges en Junio de 2002.