



Midiendo la centralidad de la red de una aerolínea

Apellidos, nombre	Mateu Céspedes, José María (jomaces1@tra.upv.es)
Departamento	Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes
Centro	ETS de Ingeniería del Diseño. Universitat Politècnica de València

1 Resumen de las ideas clave

El 'Grado de centralidad', propuesto por Freeman, es un parámetro que asigna un valor elevado a redes de carácter radial, y un valor más reducido a redes con nodos más uniformemente conectados. Esto nos permite usarlo como indicador de la menor o mayor centralidad de una red.

En el caso de redes de transporte aéreo, valores altos de este indicador identifican redes del tipo H&S, mientras que valores bajos del indicador identifican redes que podemos catalogar como 'punto a punto'. El grado de centralidad de una red se convierte así en una buena herramienta para el análisis de redes de transporte aéreo.

2 Introducción

Los acuerdos bilaterales de servicios aéreos establecidos en el siglo XX fijaban el número de aeropuertos desde los que volar entre un país y otro. Estos ASA (por las siglas en inglés de Air Service Agreements) limitaban además el número de compañías de transporte aéreo que podían operar estos vuelos internacionales, normalmente a las denominadas *compañías de bandera* de ambos países. Para dar servicio internacional al resto de aeropuertos del país, y condicionadas por estas limitaciones del marco regulatorio, estas compañías de bandera establecían rutas domésticas que enlazaban ese punto de salida internacional con el resto de destinos nacionales. Ese aeropuerto internacional actuaba así como concentrador (*hub*), y se conectaba a los demás destinos nacionales mediante rutas radiales (*spokes*), configurando una red cuya topología se denomina **hub & spoke** (H&S).

Además de adaptarse al marco regulatorio internacional, estas redes H&S permitían multiplicar los pares origen-destino optimizando al mismo tiempo los costes, pues con un número reducido de rutas se conectaba un volumen importante de aeropuertos. Obsérvese cómo los cinco puntos de la Figura 1 están enlazados con sólo cuatro conexiones. Una red de conexiones directas entre todos los puntos necesitaría diez conexiones.

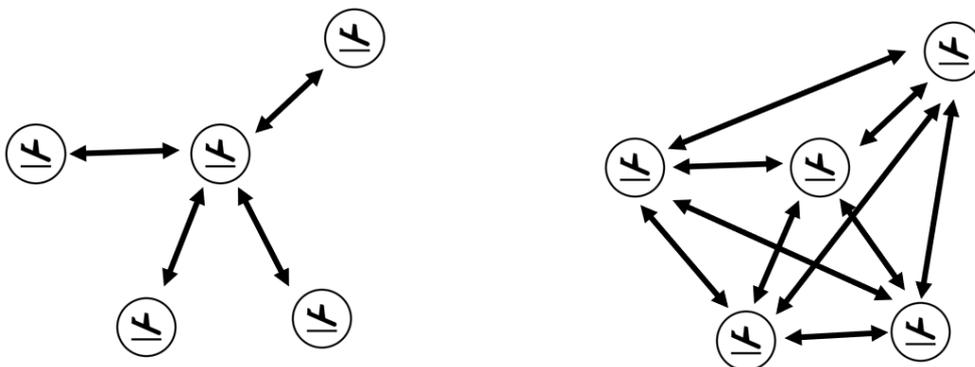


Figura 1.- Comparando una red H&S con una punto a punto.

La colaboración entre las compañías designadas en un ASA por cada uno de los países (habitualmente una por país) venía estimulada por lo establecido en esos

acuerdos, pues llegaba a concretarse incluso la capacidad ofertada en la ruta internacional, y que esa capacidad debía ser ofrecida en general al 50% por ambas compañías. Los acuerdos de código compartido entre ambas aerolíneas permitían además ofertar la capacidad de ambas a los residentes en ambos países, aumentando así la frecuencia de vuelos disponible en la ruta. El resultado era una red con dos hubs que permitía viajar desde cualquier aeropuerto de uno de los dos países a cualquier aeropuerto del otro con sólo dos escalas. El ejemplo de la Figura 2 representa de manera esquemática una red de estas características entre España y Estados Unidos.

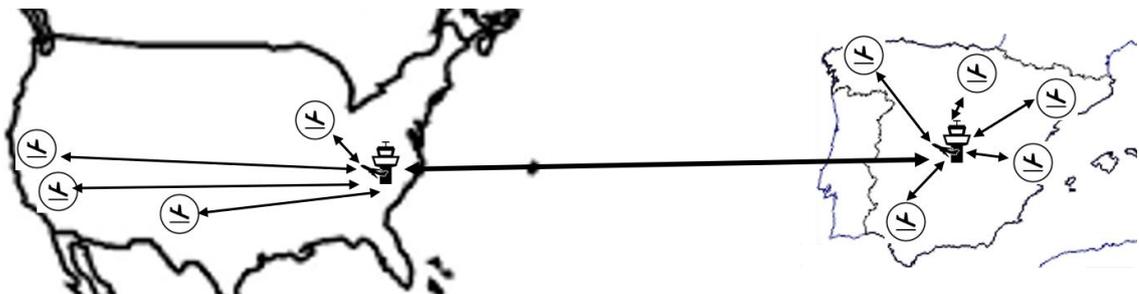


Figura 2.- Representación esquemática de una red con dos hubs para dar servicio a los viajes entre España y Estados Unidos.

El proceso liberalizador de finales del siglo XX, que no concluiría en Europa hasta principios del XXI, abrió la puerta a la competencia de un buen número de aerolíneas que comenzaron a prestar servicio entre aeropuertos periféricos de la red mundial. El crecimiento de la demanda mundial y la gestión operativa de estas aerolíneas, basada en el modelo de **bajo coste** (low cost), hicieron posible la viabilidad de estas rutas directas. Estas aerolíneas comenzaron así a configurar redes de vuelos directos (o punto a punto), alternativas a las redes H&S de las compañías tradicionales.

Con el tiempo, ya avanzado el siglo XXI en el caso de Europa, las aerolíneas de bajo coste comenzaron a desarrollar características más propias de las aerolíneas tradicionales, alejándose de las que en su origen les dieron el éxito. Este proceso se ha denominado de **hibridación**, y el resultado es un modelo de negocio que se puede considerar nuevo, el modelo híbrido. Entre estas nuevas características destacan: el enfoque al pasajero de negocio, una propuesta de valor incrementada (más comodidad en cabina, aeropuertos principales), mayor flexibilidad para cambios y cancelaciones (asociada a tarifas *premium*), y la oferta de un mayor número de destinos mediante vuelos con escala. Esta última característica se traduce en la práctica en el establecimiento de hubs y en la oferta de vuelos con escala.

El contexto actual ofrece, en función de lo comentado, una mayor diversidad topológica de las redes configuradas por las aerolíneas, incluyendo redes H&S, redes punto a punto, y redes con mayor o menor grado de hibridación. El análisis de estas redes se hace así más complejo, pero no deja de ser relevante conocer en qué medida una red se ajusta o no a la estrategia establecida por la aerolínea. O hacia dónde debería evolucionar para un mejor ajuste de estrategia y red. No olvidemos que, en última instancia, la coherencia de lo que se hace es una condición necesaria para el éxito de una estrategia.

3 Objetivos

El objetivo de este artículo es examinar el concepto de centralidad de una red de rutas aéreas, proveyendo al lector de una herramienta para medirla.

El lector podrá tras su lectura:

- Medir el grado de centralidad de la red de una aerolínea.
- Identificar la correspondencia entre estrategia y centralidad de la red.
- Detectar desajustes entre la estrategia y la topología de la red de una aerolínea.

4 Desarrollo

4.1 La Teoría de grafos y el grado de conectividad

La Teoría de grafos es una rama de las matemáticas que estudia las propiedades de los grafos. Entendemos por grafo un conjunto no vacío de nodos o vértices (V) y un conjunto de aristas o segmentos (E) que unen pares de vértices. El ejemplo de la Figura 3 representa un grafo de cinco vértices (a, b, c, d y e) y cuatro aristas (que identificamos por sus extremos unidos por un guion a-b, a-d, c-d y b-e).

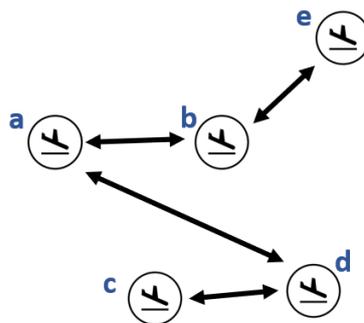


Figura 3.- Representación gráfica de un grafo con cinco vértices y cuatro aristas.

La Teoría de grafos tiene numerosas aplicaciones en campos como la geometría, el análisis de redes eléctricas (Leyes de Kirchhoff), la química (enlaces entre átomos), la gestión de proyectos (PERT), las redes de comunicación, etc.

La aplicación de la Teoría de grafos a las redes de transporte ha generado una importante literatura. Para los objetivos de este artículo nos interesa en particular el trabajo de Freeman (1979), que se enfoca, entre otros aspectos, al estudio de la **centralidad** de una red (en su caso se enfoca al estudio de la centralidad de una red de personas o 'red social', aunque en su tiempo las acepciones de este concepto eran más limitadas). Seguimos a partir de aquí algunas de sus propuestas.

En la red de la Figura 3, un indicador de la mayor o menor conectividad de un nodo o vértice de la red sería el número de otros nodos que están conectados a él, según se define en la Ecuación 1.

$$c(k) = \sum_{i=1}^n f(i, k)$$

Donde: $c(k)$ es el Grado de conectividad del nodo k
 $f(i, k)$ es una función que vale 1 si y sólo si los nodos i y k están conectados por una arista, y 0 en cualquier otro caso
 n es el número total de nodos de la red

Ecuación 1.- Medida de la conectividad de un nodo de un grafo.

En el ejemplo de la Figura 3, la conectividad de los nodos a , b y d es igual a 2, mientras que la de los nodos c y e es igual a 1.

Esta medida podría normalizarse, dividiendo por el máximo número de nodos a los que un nodo podría estar conectado, $n-1$ (4 en el ejemplo). De este modo, la conectividad normalizada máxima sería igual a 1, y sería la de un nodo conectado a todos los demás del grafo.

En el ejemplo de la Figura 3, los nodos a , b y d tendrían una conectividad normalizada igual a 0,5, mientras que la de los nodos c y e sería igual a 0,25.

4.2 El grado de centralidad de un grafo (de una red)

Para medir cómo de centralizada está una red, Freeman propone la expresión recogida en la Ecuación 2.

$$GC = \frac{\sum_{i=1}^n [Max. c(k) - c(i)]}{(n-1)(n-2)}$$

Donde: GC es el Grado de Centralidad de la red
 $Max.c(k)$ es el Grado de conectividad del nodo mejor comunicado de los n nodos de la red
 $c(i)$ es el Grado de conectividad del nodo i
 $(n-1)(n-2)$ equivale al máximo valor que puede alcanzar el numerador y, al dividir, normaliza el resultado, haciéndolo variar entre 0 y 1

Ecuación 2.- Medida del grado de centralidad de un grafo.

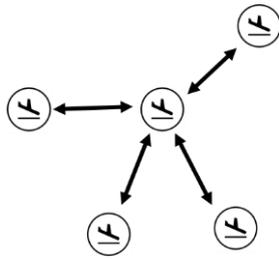
En el caso de la Figura 3, la centralidad sería de 0,167. Veamos cómo se obtiene este valor al sustituir los distintos parámetros en la Ecuación 2. Siendo 2 la conectividad del nodo mejor comunicado y 5 el número total de nodos:

$$GC = \frac{(2-2) + (2-2) + (2-1) + (2-2) + (2-1)}{(5-1)(5-2)} = \frac{2}{12} = 0,167$$

Ecuación 3.- Aplicación al ejemplo.

Veamos algunos otros casos particulares que nos pueden ilustrar sobre la información que este indicador nos puede ofrecer (Figura 4).

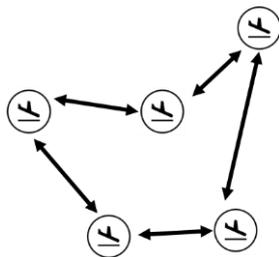
Caso 1.- Red H&S o en estrella (un hub).



El nodo central (hub) tiene una conectividad de $n-1$ y, a su vez, el resto de nodos ($n-1$) tienen una conectividad de 1. El Grado de centralidad es por tanto:

$$GC = \frac{(n-1)(n-1-1) + ((n-1) - (n-1))}{(n-1)(n-2)} = 1$$

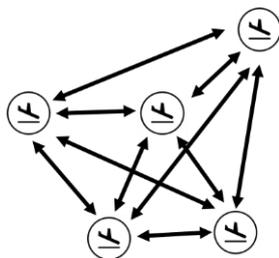
Caso 2.- Red circular.



Todos los nodos tienen una conectividad de 2, por tanto, el Grado de centralidad es:

$$GC = \frac{n(2-2)}{(n-1)(n-2)} = 0$$

Caso 3.- Red punto a punto (un hub).



Todos los nodos tienen una conectividad de $n-1$, por tanto, el Grado de centralidad es:

$$GC = \frac{n((n-1) - (n-1))}{(n-1)(n-2)} = 0$$

Figura 4.- Grado de centralidad de algunas topologías básicas.

4.3 Algunos ejemplos reales

Veamos algunos ejemplos de redes de aerolíneas reales, y veamos en qué medida se acercan o alejan a los supuestos teóricos anteriores.

La red de la aerolínea alemana Air Dolomiti enlazaba 15 destinos de Alemania, Italia y Austria con 16 rutas, según la web de Flight Connections consultada el 20 de marzo de 2020 (ver Figura 5). El destino con más conexiones era Munich, con 12. La Tabla 1 recoge el cálculo del Grado de Centralidad de su red, que resulta ser de 0,8132.



Figura 5.- Red de Air Dolomiti (fuente: flightconnections.com)

Destinos	Rutas	Diferencia	
Munich	12	0	
Frankfurt	4	8	
Verona	2	10	
Florencia	2	10	
Turín	2	10	
Graz	1	11	
Linz	1	11	
Milán	1	11	
Venecia	1	11	
Bolonia	1	11	
Genoa	1	11	
Pisa	1	11	
Ancona	1	11	
Olbia	1	11	
Bari	1	11	
Núm. De rutas	16		
Dest. Con + con.	12	148	Suma (numerador)
Núm. Destinos	15	182	Máximo posible (denom.)
		0.8132	Grado de centralidad

Tabla 1.- Cálculo del Grado de centralidad de la red de Air Dolomiti



Recogemos a continuación el resultado de un análisis análogo hecho para el caso de la aerolínea Volotea, realizada a partir de los destinos y rutas publicadas en su web el 15 de marzo de 2020.

La red de Volotea presentaba 80 destinos, de los que los más conectados eran Venecia y Nantes, en los que confluían 32 de las 293 rutas con las que contaba la aerolínea. El número de rutas por aeropuerto variaba entre la ruta única de destinos como Biarritz, A Coruña o Trieste y los 25 de Burdeos, 26 de Palermo y los 32 comentados para los casos de Venecia y Nantes. Introduciendo en la hoja de cálculo las conexiones de cada destino, obtuvimos un Grado de Centralidad de 0,32.

5 Cierre

El grado de centralidad propuesto por Freeman, identifica de manera efectiva en qué medida una red tiene una topología de carácter radial, o no. Las redes con una topología H&S presentan un elevado grado de centralidad, mientras que el grado de centralidad de las redes punto a punto es más reducido.

6 Bibliografía

6.1 Libros:

Metcalf, Leigh y Casey, William, 2016. **Cybersecurity and Applied Mathematics**. Syngress, Madrid.

6.2 Artículos:

Freeman, Linton, C., 1979. **Centrality in Social Networks. Conceptual Clarification**. Social Networks, 1, pp. 215-239.

6.3 Webs:

www.flightconnections.com

www.volotea.com