



EL COLEGIO DE MÉXICO

ECONOMÍA DE REDES

Trabajo Final

Alumno:

Héctor Rodrigo Escobar Rodríguez

May 17, 2024

Abstract

Las redes eléctricas son esenciales para la sociedad moderna, proporcionando energía a hogares, negocios e industrias. Sin embargo, enfrentan amenazas constantes de eventos naturales, fallas en equipos y acciones maliciosas. Un ejemplo notable es la resiliencia de la red eléctrica ucraniana frente a los ataques durante la guerra entre Rusia y Ucrania, lo que plantea preguntas sobre qué hace a las redes eléctricas particularmente robustas. Este trabajo se centra en evaluar la robustez de la red eléctrica de EE. UU. mediante el análisis de la conectividad de la red y la identificación de nodos críticos. Se analiza el impacto de la eliminación de nodos de alto grado en la estructura y funcionalidad de la red. Para esto, observamos el tamaño del componente gigante y el número de componentes nuevos que se forman conforme se desconectan más nodos. Los resultados indican que desconectar completamente una red implica eliminar entre el 5% y el 10% de los nodos más críticos. Esto sugiere que las redes eléctricas son altamente robustas ante ataques dirigidos.

Introducción

La distribución eficiente de energía es crucial para mantener en funcionamiento cualquier economía moderna, proporcionando energía para alimentar hogares, negocios, e industrias. Sin embargo, este tipo de redes enfrenta constantemente desafíos que ponen a prueba su capacidad para mantener un suministro confiable y estable. Al igual que con otros tipos de infraestructura, uno de estos desafíos es la amenaza de fallos en la red, ya sea debido a eventos naturales, fallas en equipos, o a acciones maliciosas concertadas.

Por ejemplo, desde el comienzo de la guerra entre Rusia y Ucrania en 2022, Rusia ha buscado sistemáticamente destruir la infraestructura eléctrica ucraniana, con el propósito de evitar el traslado de tropas y equipo al frente (BBC, 2024). A pesar de cerca de dos años de bombardeos continuos, la red ucraniana no ha colapsado y hasta la fecha continua funcionando con relativa normalidad. Esto puede ser contraintuitivo: uno pensaría que la destrucción de infraestructura crítica tendría un efecto desastroso. No es difícil imaginar - por ejemplo- el caos que se generaría si dejara de funcionar el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. ¿Qué hace especial a las redes eléctricas?

En este contexto, el análisis de robustez emerge como una herramienta fundamental para evaluar la capacidad de la red para resistir y recuperarse de tales eventos disruptivos. Comprender cómo la red responde ante la pérdida de nodos críticos y cómo se ve afectada su conectividad es esencial para responder esta pregunta. Adicionalmente nos permite desarrollar estrategias efectivas de mitigación de riesgos y fortalecer la resiliencia del sistema.

En este trabajo, mi objetivo es evaluar la robustez de la red eléctrica de EE. UU. a través del análisis de la conectividad de la red y la identificación de nodos críticos. Utilizando métodos de análisis de

redes, examino el impacto de la remoción de nodos de alto grado (medido según las distintas medidas de centralidad de nodos) en la estructura y funcionalidad de la red. Esto lo hago midiendo el número de componentes nuevos que se crean al remover estos nodos, y midiendo el tamaño del componente gigante. Encuentro que desconectar una red eléctrica implicaría eliminar entre el 5% y el 10% de los nodos con mayor número de conexiones directas (centralidad de grado) o *betweenness centrality* (centralidad de intermediación), lo cual para la red analizada representa entre 200 y 500 nodos. La conclusión directa es que las redes eléctricas son extremadamente robustas ante ataques dirigidos

Descripción de los Datos

Para este trabajo utilizo la red no-dirigida y no-ponderada utilizada originalmente por Watts and Strogatz (1998). Esta red representa la red eléctrica de los estados de la costa oeste de Estados Unidos. Cada nodo es una planta de generación electricidad, una subestación eléctrica, o un transformador. Las segundas suelen funcionar como hubs de transmisión y distribución de la electricidad generada en las plantas, mientras que los transformadores regulan el voltaje y suelen ser parte de la distribución final hacia las zonas pobladas. Los vínculos entre nodos son líneas de transmisión de alto voltaje.

Un inconveniente de esta red es que - probablemente por motivos de seguridad - no se conoce específicamente a qué tipo de estación corresponde cada nodo. Adicionalmente, los nodos son anónimos. Están denotados por números y no se conoce su nombre o denominación real.

La Figura 1 muestra el mapa la red y la Tabla 1 muestra sus datos básicos. El grado del exponente de la distribución implica una distribución desigual, similar a la distribución de las palabras más comunes en el idioma inglés (Newman, 2004). El coeficiente de *clustering* sugiere que la red eléctrica es relativamente descentralizada y no tiene ningún *hub* especialmente grande. Esto probablemente se deba al hecho de que el sistema eléctrico sigue una estructura jerárquica y geográficamente dispersa: de las estaciones de generación a las subestaciones eléctricas, y de éstas a los transformadores para la distribución final en las zonas urbanas. No tendría sentido, por ejemplo, conectar un transformador directamente con una estación de generación, o a dos estaciones de generación entre sí, lo cual limita la cantidad de los nodos con los que cualquier nodo dado se puede conectar. Esto se puede comparar con una red aeroportaria, donde todos los aeropuertos pueden conectarse entre sí. Adicionalmente, la transmisión de electricidad entre distancias largas se realiza mediante el almacenamiento en distintas subestaciones a lo largo del camino, las cuales pueden verse como 'paradas' entre un punto inicial y un punto final. Por ejemplo, una estación de generación ubicada en California no transmite energía directamente hasta Oregon, si no que tiene que atravesar varios nodos. Un aeropuerto, en cambio, si puede tener conexiones directas a muchos otros aeropuertos

La Figura 2 muestra el histograma de la distribución de grados de los nodos. Como es típico de

este tipo de redes, una gran mayoría de nodos tiene pocas conexiones, y los nodos muy conectados son relativamente raros.

Table 1: Red Eléctrica de E.E.U.U (Costa Oeste)

Medida	
Nodos	4,941
Links	6,594
Triángulos	651
Grado Máximo	19
Grado promedio	2.66
Diámetro	46
Exponente Power Law	2.2
Coficiente Clustering	0.1

Nota: Los datos corresponden a la red eléctrica de Estados Unidos (oeste).

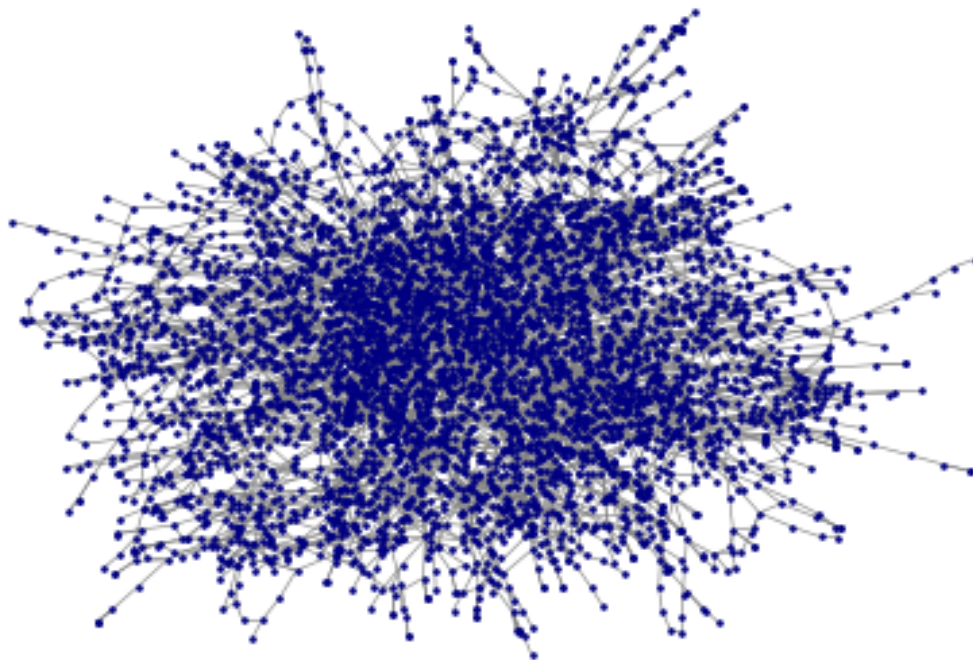


Figure 1: Mapa de la Red Eléctrica de E.E.U.U

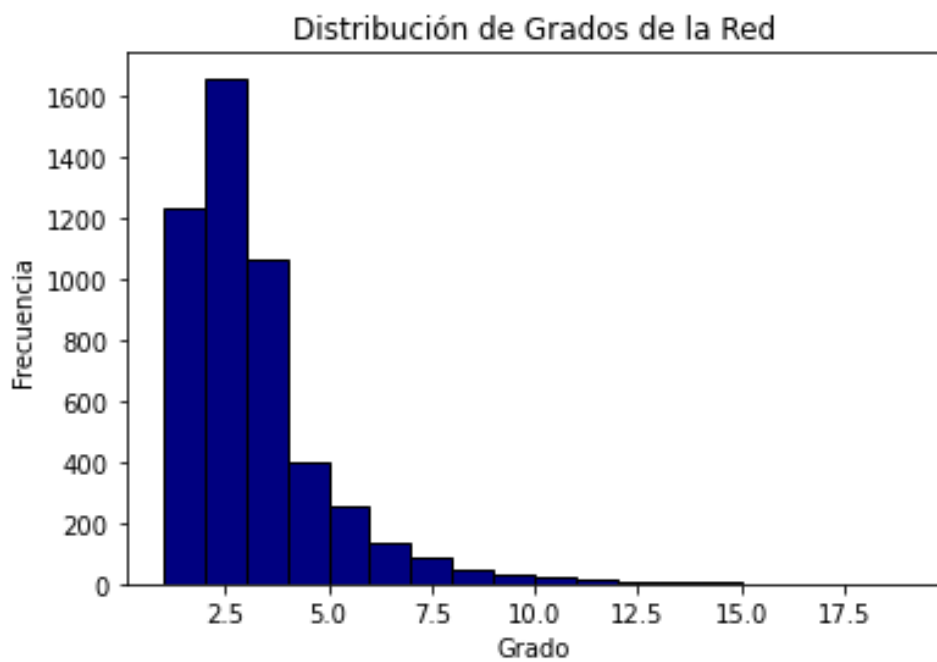


Figure 2: Histograma de la Distribución de Grados

Experimento

El propósito de este trabajo es analizar la robustez de la red eléctrica midiendo el impacto de la remoción de nodos de alto grado en la estructura y funcionalidad de la red. Para esto, primero tenemos que detectar los nodos más importantes. Esto lo hago evaluando tres medidas de centralidad comunes: *degree centrality* (centralidad de grado), *betweenness centrality* (intermediación), y *closeness centrality* (cercanía).

La Tabla 2 muestra las medidas de centralidad de los 15 nodos con mayor *degree*, *betweenness*, y *closeness centrality* respectivamente. Los nodos con más conexiones probablemente sean subestaciones eléctricas que abastecen zona metropolitanas, por lo que necesitan estar conectadas a un gran número de transformadores y de otras subestaciones.

Los nodos con mayor *betweenness centrality* son nodos críticos porque un gran número de los caminos más cortos pasan a través de aquellos nodos. Por ejemplo, casi el 29% de las transmisiones de electricidad pasan por el nodo más importante según esta medida. Probablemente esto implica que estos nodos se encuentran geográficamente en puntos medios (posiblemente al norte de California), y podríamos aventurarnos a decir que son subestaciones eléctricas. (Los transformadores, en cambio, deberían ser hojas o encontrarse casi al final de la red, porque en estos únicamente se regula el voltaje para la distribución final en las zonas urbanas). Si estos nodos fallaran se tendría que buscar otro camino más largo para no interrumpir la transmisión de electricidad, con la consecuente pérdida de eficiencia que esto traería.

Los nodos con mayor *closeness centrality* son aquellos que - en promedio - se encuentran más cerca de todos los nodos. A menudo estos nodos no tienen tantas conexiones, y de hecho esto también ocurre en esta red. Posiblemente estos nodos son estaciones de generación y únicamente están conectados a algunas pocas subestaciones. Sin embargo, se ubican en muchos de los caminos más cortos.

Ya que hemos detectados los nodos más críticos de la red podemos analizar como ésta reacciona ante un ataque simulado en contra de estos nodos. Para esto, simulamos que deja de funcionar el nodo más alto según una de las medidas de centralidad, y vemos en cuantos componentes se parte la red y cuál es el tamaño del componente más grande (el gigante). A continuación hacemos lo mismo, pero con los $n + 1$ nodos más altos. Hacer esto para las tres medidas de centralidad es útil porque nos permite determinar cual medida de centralidad es más importante para este tipo de redes.

Table 2: Red Eléctrica de E.E.U.U. Principales nodos de acuerdo a distintas medidas

Medidas de centralidad					
Degree Centrality	N	Betweenness Centrality	N	Closeness Centrality	N
0.0038	19	0.288	7	0.081	5
0.0036	18	0.281	6	0.080	6
0.0028	14	0.279	6	0.080	4
0.0028	14	0.277	3	0.079	4
0.0028	14	0.267	6	0.079	7

Las Tablas 3, 4 y 5 muestran en cuántos componentes se parte la red y el tamaño de los componentes conectados más grandes conforme se remueven los nodos más críticos. Ver cómo disminuye el tamaño del componente gigante es de fundamental importancia porque nos permite saber qué tan desconectada está la mayor parte de la red. Un componente gigante muy pequeño, por ejemplo, implicaría que la red ya está completamente partida.

Table 3: Efecto de remover los nodos con mayor *Degree Centrality* en la red eléctrica de Estados Unidos

Nodos Removidos	Componentes	Tamaño Componentes más Grandes
1	2	4931, 1
2	9	4927, 3, 3, 1
5	25	4901, 4, 3, 3, 3, 3
10	33	4880, 8, 4, 3, 3, 3, 3
25	58	4805, 16, 9, 8, 4, 3, 3
50	105	4645, 17, 16, 11, 9, 8, 8, 7
100	209	4292, 47, 19, 18, 17, 16, 15, 11, 11
200	430	2973, 236, 143, 85, 67, 52, 34, 33, 31, 23, 22
500	958	671, 159(2), 133, 61, 57, 50, 49, 47(2), 45, 42, 41
750	1375	155, 103, 94, 87, 52, 43, 42, 37, 33, 30, 28, 27, 26
1000	1747	46, 36, 33, 30, 24, 23, 19(2), 18(2), 17(3), 16, 15

Table 4: Efecto de remover los nodos con mayor *Betweenness Centrality* en la red eléctrica de Estados Unidos

Nodos Removidos	Componentes Conectados	Tamaño Componentes más Grandes
1	1	4940,
2	1	4939,
5	1	4936,
10	2	4930
25	5	4908, 5 1(3)
50	19	4861, 9, 5, 1(16)
100	69	4349, 23, 187, 105, 55, 23
200	136	2823, 886, 185, 125, 105, 102
500	495	752, 228, 215, 153, 151, 129
750	781	320, 206, 87, 73, 75, 73
1000	1013	137, 106, 83, 51, 44, 41, 40

Table 5: Efecto de remover los nodos con mayor *Closeness Centrality* en la red eléctrica de Estados Unidos

Nodos Removidos	Componentes	Tamaño Componentes más Grandes
1	1	4940, 2
2	2	4939, 3
5	2	4937, 3
10	7	4922, 8, 4, 3(4))
25	16	4900, 2, 1(15)
50	28	4840, 14, 5, 4, 3, 2
100	46	4695, 47, 19, 18, 17, 16, 15
200	56	4604, 17, 16, 11, 11, 6, 6
500	103	3300, 809, 53, 24, 16
750	133	2524, 702, 260, 164, 52, 43, 32
1000	166	2001, 542, 259, 148, 123, 401, 68

Las Figuras 3, 4, y 5 muestran el efecto de la remoción de nodos en el número de componentes generados. En todos los casos la relación es casi lineal, pero se observa que remover los nodos según su *closeness centrality* no tiene un efecto tan grande en la generación de componentes como lo tiene la remoción de nodos según las otras medidas de centralidad.

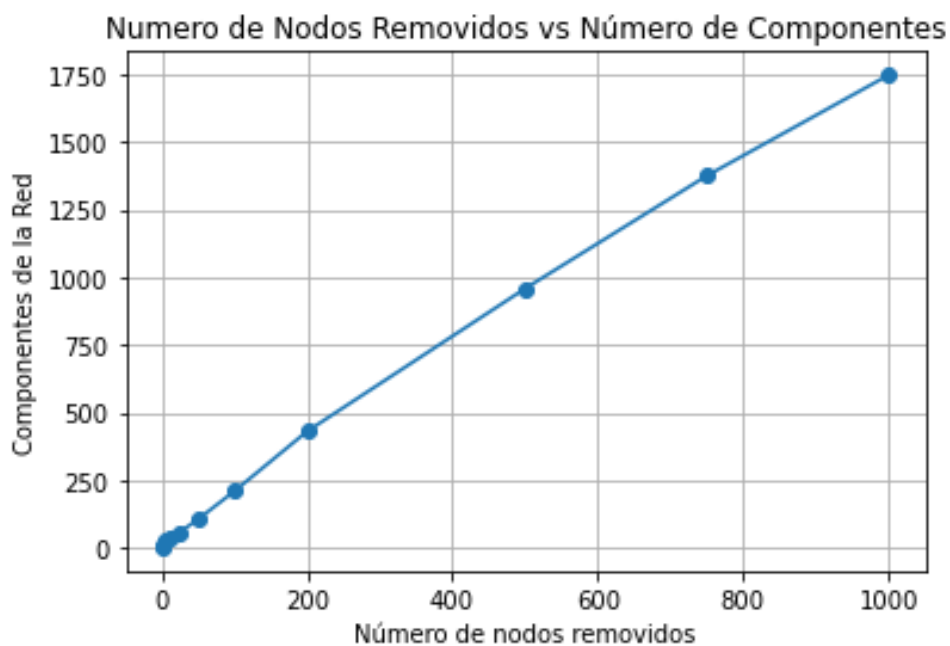


Figure 3: Número de nodos removidos según **Degree Centrality** y número de componentes resultantes en la red

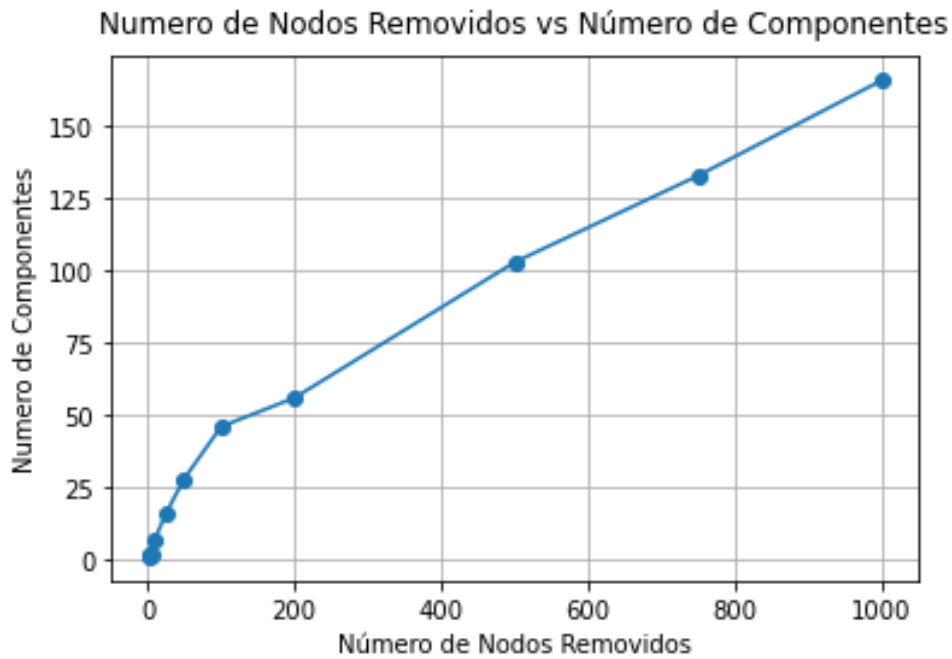


Figure 4: Número de nodos removidos según **Betweenness Centrality** y número de componentes resultantes en la red

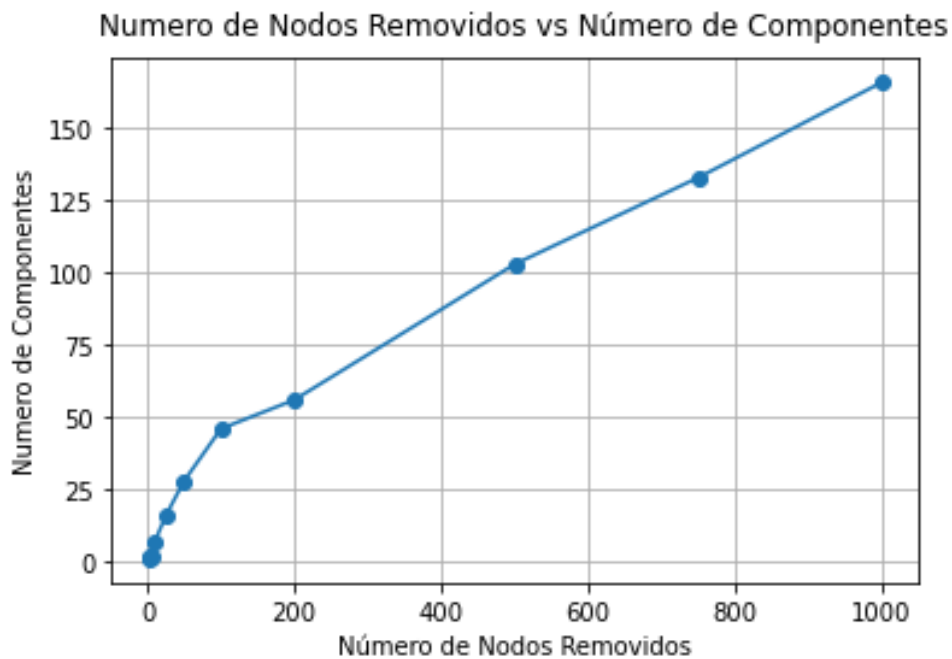


Figure 5: Número de nodos removidos según **Closeness Centrality** y número de componentes resultantes en la red

Las Figuras 6 y 7 muestran el tamaño del componente gigante conforme se van removiendo nodos. Remover unos pocos nodos, aunque sean los más críticos (independientemente de la medida de centralidad), no afecta el tamaño del gigante. Éste se vuelve más pequeño porque se están desconectando ramas (los otros componentes que se forman), pero la red permanece casi completamente conectada. Si continuamos removiendo nodos el tamaño del gigante continua cayendo de manera lineal, pero algo

interesante ocurre después de que ya han sido desconectados 100 nodos: el gigante comienza a crecer de manera acelerada. En este punto existe una suerte de rendimientos crecientes a la remoción de nodos, donde cada desconexión adicional tiene un efecto cada vez mayor en la conectividad de la toda red en conjunto.

Estos rendimientos se siguen observando hasta haber removido aproximadamente 500 nodos (10% de la red). Si elegimos removerlos según *sudegree* o *betweenness centrality*, en este punto el gigante tiene entre 671 y 752 nodos conectados (menos de la sexta parte de toda la red), mientras que el segundo componente tiene entre 159 y 228 nodos. La implicación es que la red ha sido completamente desconectada.

A partir de este momento los rendimientos se normalizan. El efecto de remover nodos es cada vez menor. El *sweet spot* se encuentra al remover entre el **5%** y el **10%** de todos los nodos totales. Considerando que estamos haciendo referencia a redes que tienen miles de nodos, no es sorprendente que estas redes sean tan resistentes.

Por otra parte, la Figura 8 muestra el efecto de remover los nodos con mayor *closeness centrality*. El efecto es notablemente menor: remover 500 nodos parte a la red en 103 componentes, y el gigante tiene 3300 nodos. Solamente se ha desconectado aproximadamente 25% de la red, aproximadamente la tercera parte de lo que se había logrado removiendo nodos con otras medidas de centralidad. Esto es porque los nodos con mayor *closeness centrality* se encuentran relativamente cerca de todos los otros nodos, pero no necesariamente son la única conexión posible entre estos. El resultado sería muy distinto, por ejemplo, si lo que nos interesara fuera esparcir un virus en la red eléctrica.

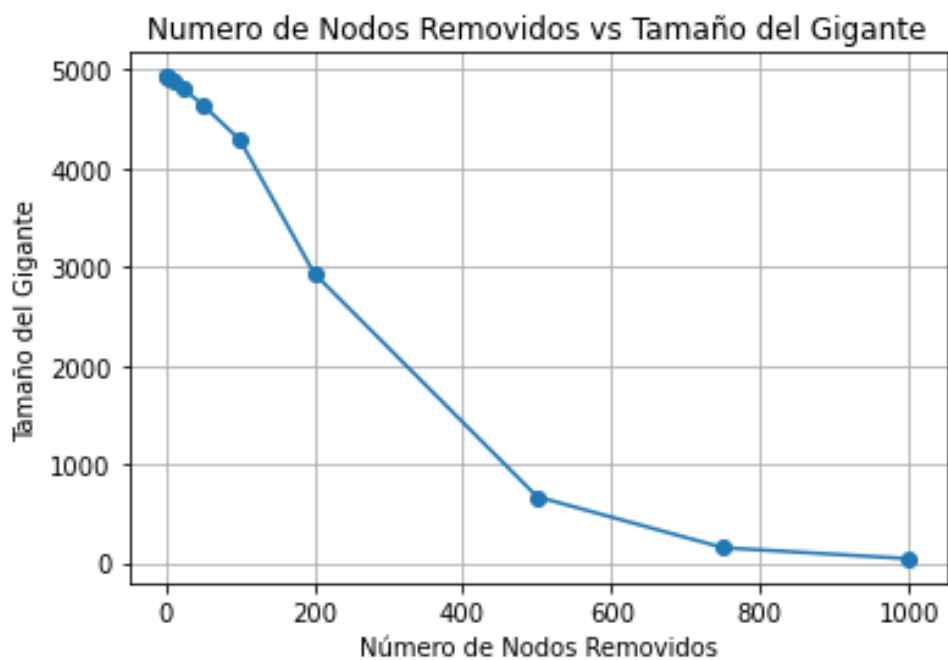


Figure 6: Número de nodos removidos (*Degree Centrality*) y tamaño del gigante

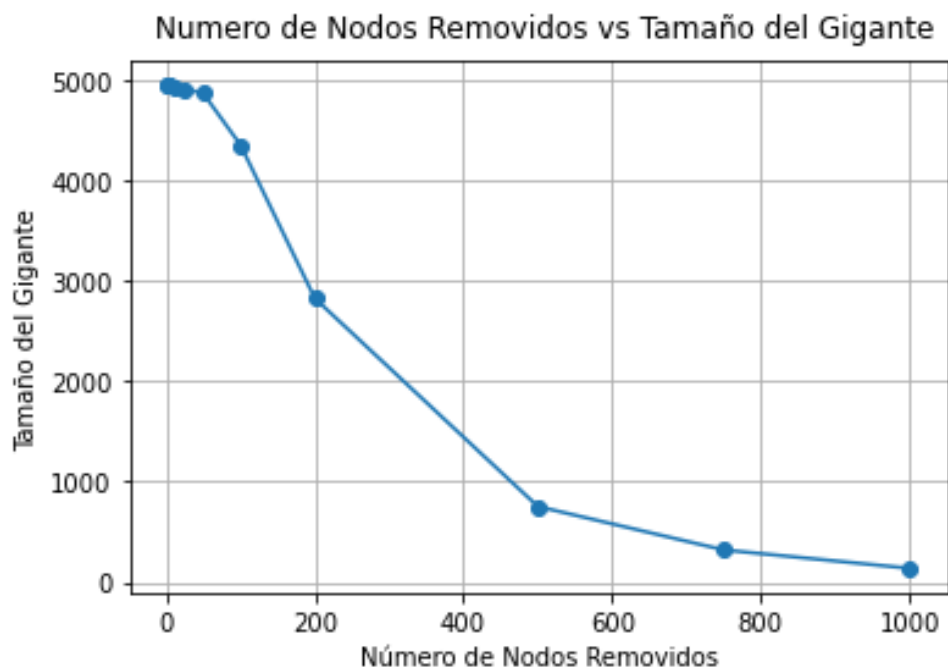


Figure 7: Número de nodos removidos (*Betweenness Centrality*) y tamaño del gigante

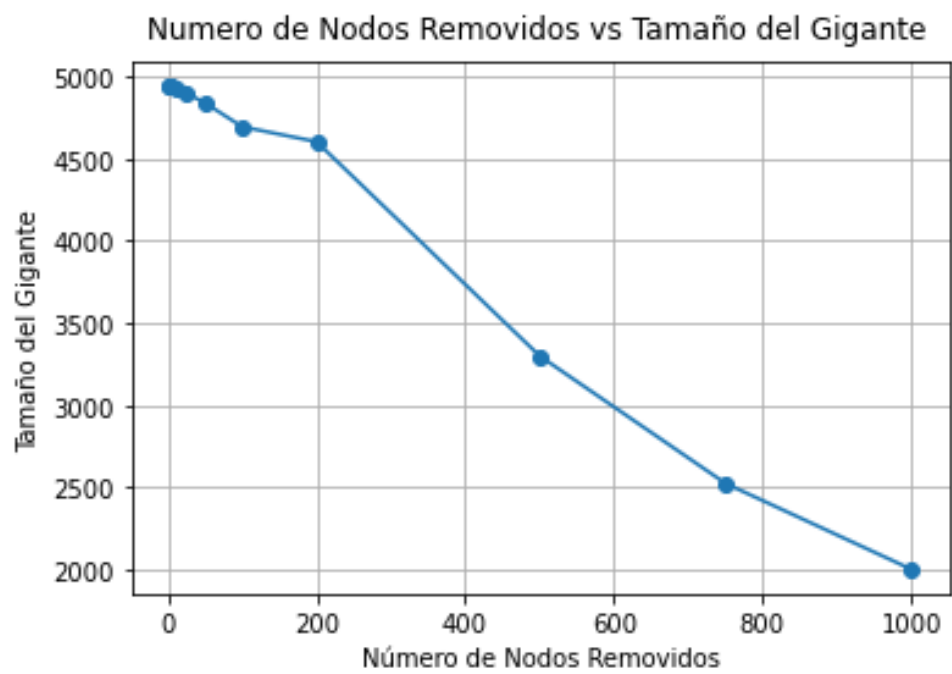


Figure 8: Número de nodos removidos (*Closeness Centrality*) y tamaño del gigante

Conclusión

A diferencia de otros tipos de infraestructura, como los puertos, aeropuertos, y las estaciones de trenes, la red del sistema eléctrico es muy dispersa. No existen *hubs* cuya destrucción podría comprometer la red. Hacer que ésta colapse implicaría destruir entre el **5%** y el **10%** de los nodos más críticos. En el caso de la red que analizamos en este trabajo, esto equivale a aproximadamente entre 250 y 500 nodos. Regresando a la red ucraniana mencionada al inicio, tendrían que destruirse entre 150 y 300 nodos. Semejante grado de destrucción es extremadamente difícil de realizar, incluso en un estado de guerra total donde el enemigo conoce cuáles son los nodos críticos y está empeñado en destruirlos. Esto puede explicar la resiliencia del sistema eléctrico ucraniano.

Una conclusión adicional que podemos extraer es que sería extremadamente complicado que una sola persona o grupo de personas saboteara una red eléctrica. La dispersión y la redundancia inherentes en la estructura de la red hacen que los intentos de sabotaje tengan que ser extremadamente extensos para tener un impacto significativo. Como vimos, la eliminación de unos pocos nodos no sería suficiente para causar un colapso completo del sistema, ya que la red puede reconfigurarse y redirigir la energía a través de otros caminos.

Otra manera diferente de sabotear una red eléctrica es destruir las centrales de generación eléctrica. De esta manera, ésta dejaría de funcionar por más conectada que esté la red. El "problema" es que las redes eléctricas de distintos países están conectadas, y se podría solucionar importando energía de otros países. De hecho esto es lo que ocurrió en Ucrania: Rusia destruyó varias centrales eléctricas, y esto se resolvió importando energía del resto de Europa (Reuters, 2023).

En conclusión, la robustez y redundancia del sistema eléctrico, junto con la posibilidad de importar energía de redes interconectadas, proporcionan una alta resiliencia frente a ataques y sabotajes. Esta resiliencia estructural es crucial para mantener la estabilidad y continuidad del suministro eléctrico, incluso en situaciones de crisis extrema (como guerras).

Bibliografía

BBC. "Ukraine hit by 'massive' attack on energy grid" May 16, 2023. <https://www.bbc.com/news/articles/c1wxytpe9jxo>

Reuters. "Ukraine plans record power imports after Russian attacks on energy system" May 16, 2023. <https://www.reuters.com/world/europe/ukraine-plans-record-power-imports-after-russian-attacks-energy-system-2024-05-1>

Watts, D., Strogatz, S. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature* 393, 440–442 (1998).

<https://doi.org/10.1038/30918>