

Infraestructura eléctrica en Argentina: análisis a partir de la Teoría de Redes

TERCER “TALLER INTERDISCIPLINARIO EN SISTEMAS COMPLEJOS”

Objetivo general

Analizar el impacto de los potenciales desperfectos en la transmisión de energía eléctrica, aplicando las técnicas propias del análisis de grafos. Los casos bajo estudio son el sistema de transmisión eléctrica de todo el país y la región de Ciudad Autónoma de Buenos Aires y Gran Buenos Aires, a fin de explorar las debilidades estructurales que provocan un funcionamiento inadecuado de la red y/o la interrupción en el servicio, generando costos privados y sociales.

Análisis descriptivo (topología y tipología de las redes)

SADI



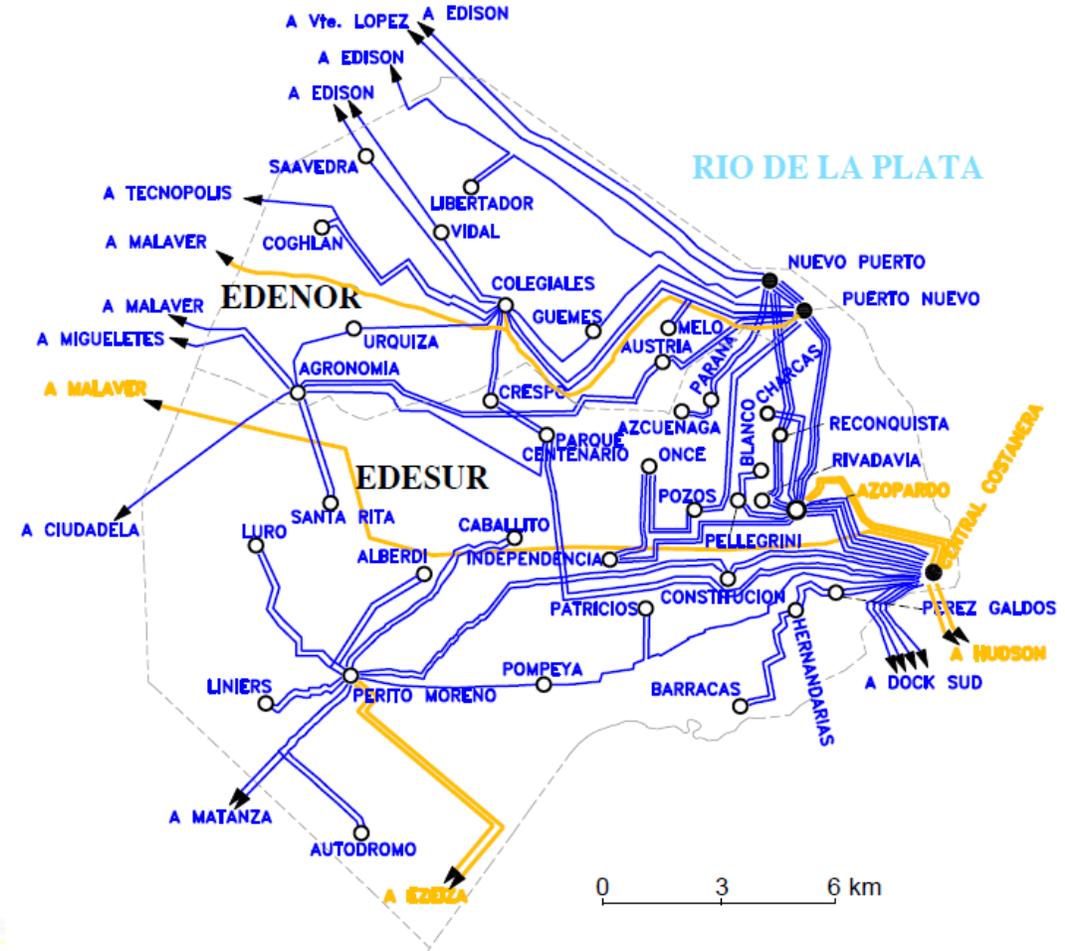
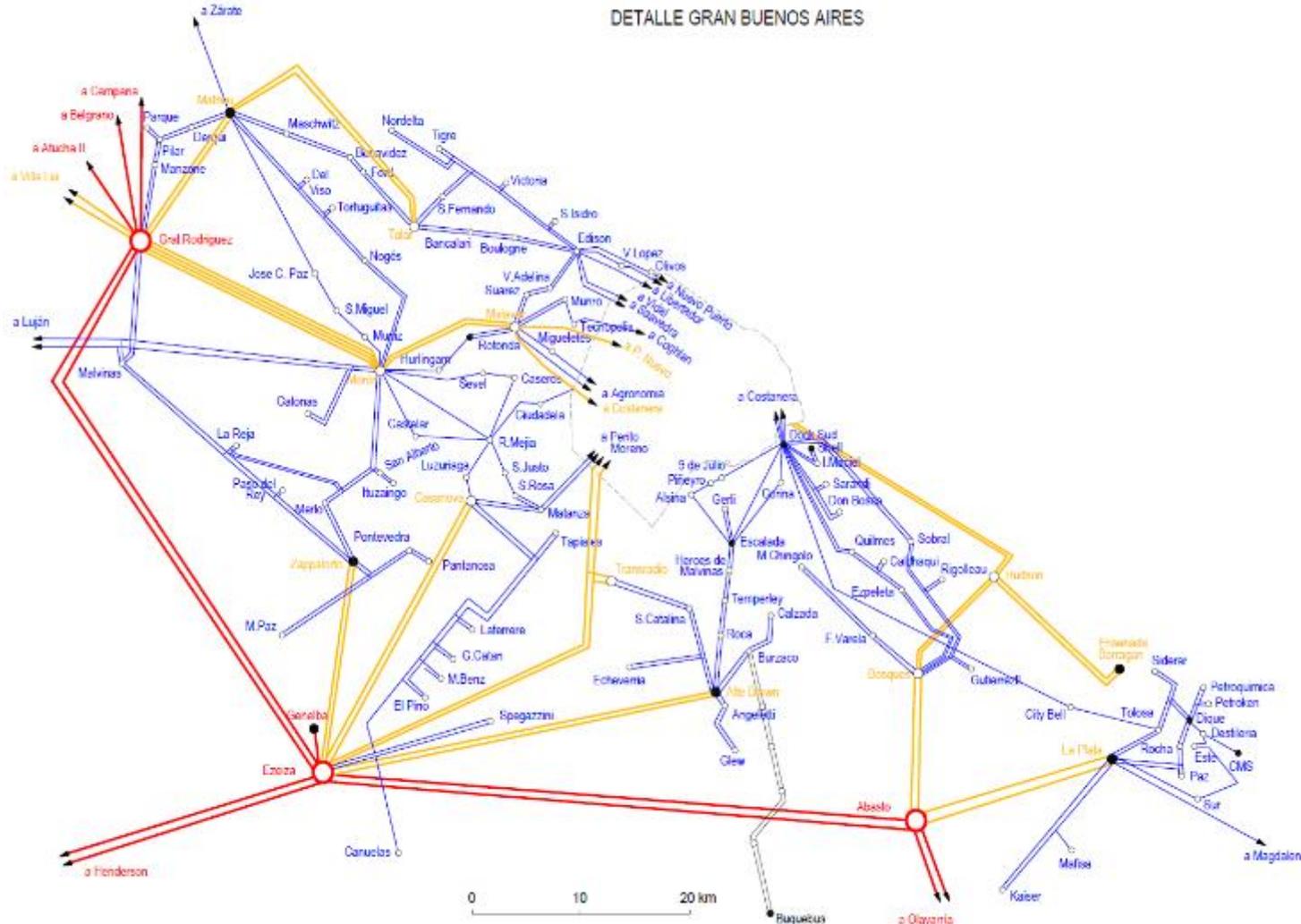
GCABA

Más detalle en el análisis regional (tal como se representa en el GEOSADI)

Fuente: Elaboración propia en R en base a CAMMESA, 2017.

GCABA

(Fuente: CAMMESA)



❖ **Grafo** -> red (sistema de elementos vinculados entre sí):

$G(N, M)$; N nodos y M conexiones entre esos nodos

❖ **Diámetro** -> distancia - d_{ij} - más larga entre dos nodos cualesquiera en la red

❖ **Distancia característica (camino más corto promedio)** -> $L = \langle d_{ij} \rangle_{ij} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in G; i \neq j} d_{ij}$

❖ **Densidad** -> $\delta(G) = \frac{2M}{N(N-1)}$

❖ **Grado promedio** -> $\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i$; $k_i = |n(i)|$

❖ **Clustering promedio** -> $\langle c \rangle = \frac{1}{N} \sum_i c_i$; $c_i = \frac{m_i}{k_i(k_i - 1)/2}$

❖ **Asortatividad** -> medida de correlación

❖ **Eficiencia global** -> $E_{global}(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in G; i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}$; Latora & Marchiori (2001, 2003)

Notar que la eficiencia se define en base a la distancia geodésica (camino mínimo): “eficiencia topológica”

❖ **Intermediación o “carga” (nodal)** -> $B_i = \sum_{j,k \in G; j \neq k} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}}$

❖ **Cercanía (nodal)** -> $Cercanía_i = \frac{1}{\sum_{i,j \in G; i \neq j} d_{ij}}$

Características topológicas de redes eléctricas reales:

	SADI (AT)	GCABA (AT y MT)	Irán (400kV)	Italia (380kV)	Francia (400kV)	España (400kV)	Brasil (AT)	Venezuela (AT y MT)	Oeste US (AT)
Nro. de vértices	533	153	105	127	146	98	230	635	4941
Nro. de conexiones	666	232	142	171	223	175	1492	1179	~6000
Grado promedio	2	3	2.705	2.69	3.05	3.57	6.487	3.71	2.67
Grado máximo	12	13	7	7	8	9	s/d	14	s/d
Camino más corto	11	5	6.88	8.47	6.61	4.92	s/d	12.17	18.7
Clustering	0.099	0.155	0.1097	0.156	0.279	0.316	0.174	s/d	0.08
Diámetro	30	11	19	25	15	11	s/d	33	s/d
Eficiencia	0.116	0.236	0.204	0.173	0.197	0.259	s/d	0.102	s/d

Fuente: Martins, G. C., Oliveira, L. S., Ribeiro, F. L., & Forgerini, F. L. (2016); Pagani, G. A., & Aiello, M. (2013); Saniee Monfared, M. A., Jalili, M., & Alipour, Z. (2014); Rocco S., C. M. (2008); Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998).

❖ Tipología

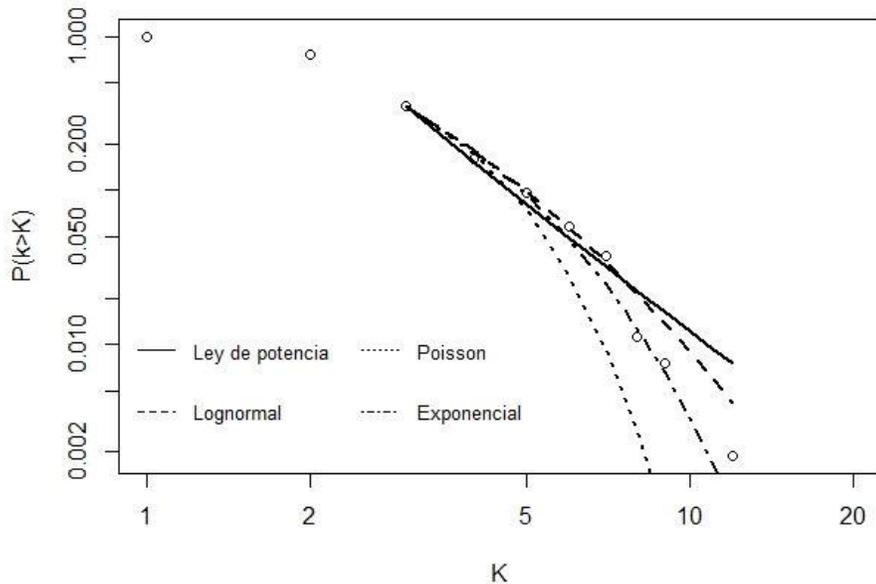
¡Parecen SW!

1. **Indicadores clave** $\rightarrow L \geq L_{rand}$; $C \gg C_{rand}$

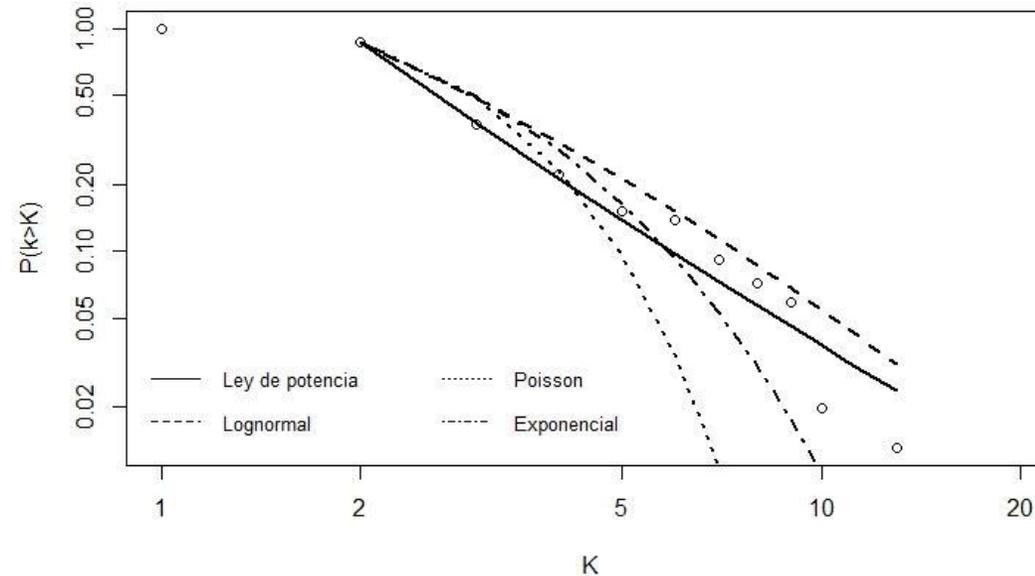
	L	Lrand	C	Crand
SADI	11	7	0,099	0,005
GCABA	5	4,5	0,155	0,019

2. **Función de distribución del grado** \rightarrow Lognormal!!

SADI - Ajuste de la distribución del grado



GCABA - Ajuste de la distribución del grado



+ Tests one-sided & two-sided

Análisis dinámico (*shock* aleatorio vs. dirigido)

❖ **Daño** -> $D = \frac{E(G_0) - E(G_f)}{E(G_0)}$; Kinney et al. (2005)



Pérdida de eficiencia ocasionada por la perturbación.

❖ **Capacidad inicial** -> $C_i = \alpha * B_i(0) ; i = 1 \dots N ; \alpha \geq 1$

(Motter y Lai, 2002; Crucitti, Latora y Marchiori, 2004; Kinney et al., 2005)

Modelos implementados

Modelo 1: *shock* aleatorio

En forma algorítmica, el proceso de falla en cascada (avalancha o apagón) cuando la perturbación es aleatoria, se describe17:

1. Calcular la capacidad inicial C_i para cada $n_i \in N$ –distintos α para esbozar distintos escenarios-
2. Remover una proporción p -con $0 < p < 1$ - de nodos en forma aleatoria
3. Evaluar la carga *ex post* $B_i(t=1)$ de cada nodo n_i en relación con su capacidad inicial C_i , calculándose $B_i(t)$ para todo t .
4. Remover los nodos con $B_i(t=1) > C_i$
5. Repetir pasos 3 y 4 para sucesivos t , hasta que $E(G_{t+j-1}) = E(G_{t+j})$, con $j > 1$.
6. Calcular el daño D .

Modelos implementados

Modelo 2: *shock* dirigido

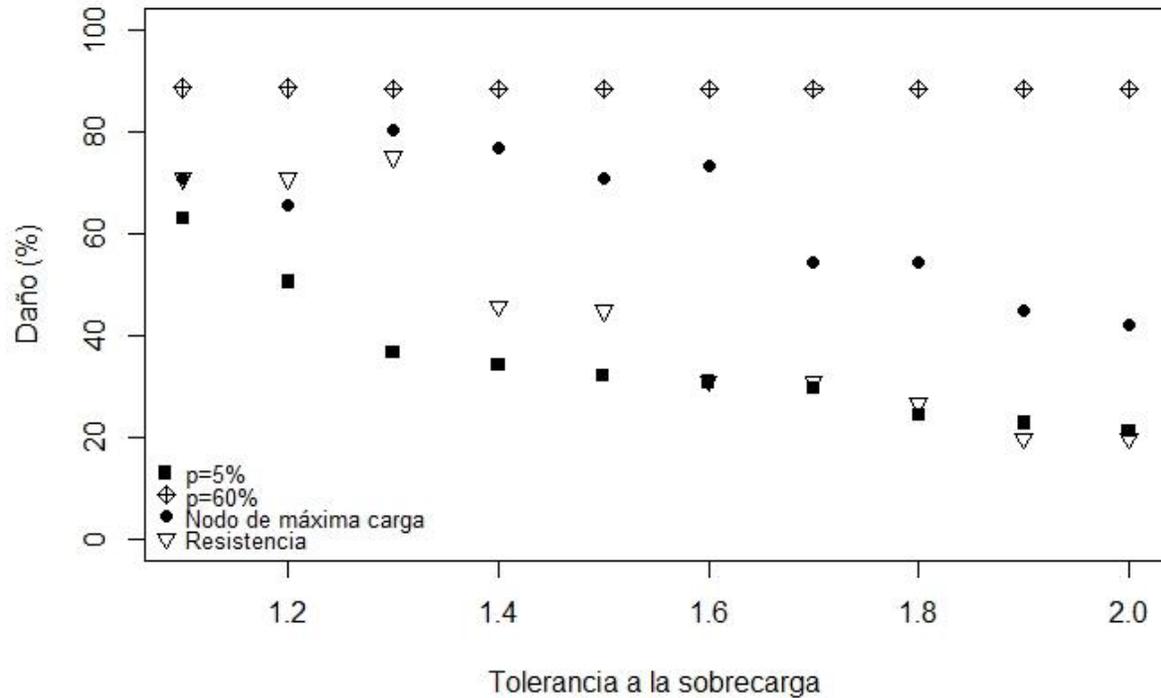
En forma algorítmica, el proceso de falla en cascada (avalancha o apagón) cuando la perturbación es dirigida, se escribe similar salvo por el paso 2 que consiste en “atacar” (remover o dejar fuera de servicio) al nodo de carga máxima, a los nodos de mayor carga en forma sucesiva (y decreciente), o bien, a algún nodo con cierta característica considerada de interés para el análisis.

1. Calcular la capacidad inicial C_i para cada $n_i \in N$ –distintos α para esbozar distintos escenarios-
2. Remover nodo(s) seleccionado(s)
3. Evaluar la carga ex post $B_i(t=1)$ de cada nodo n_i en relación con su capacidad inicial C_i
4. Remover los nodos con $B_i(t=1) > C_i$
5. Repetir pasos 3 y 4 para sucesivos t , hasta que $E(G_{t+j-1}) = E(G_{t+j})$, con $j > 1$.
6. Calcular el daño D .

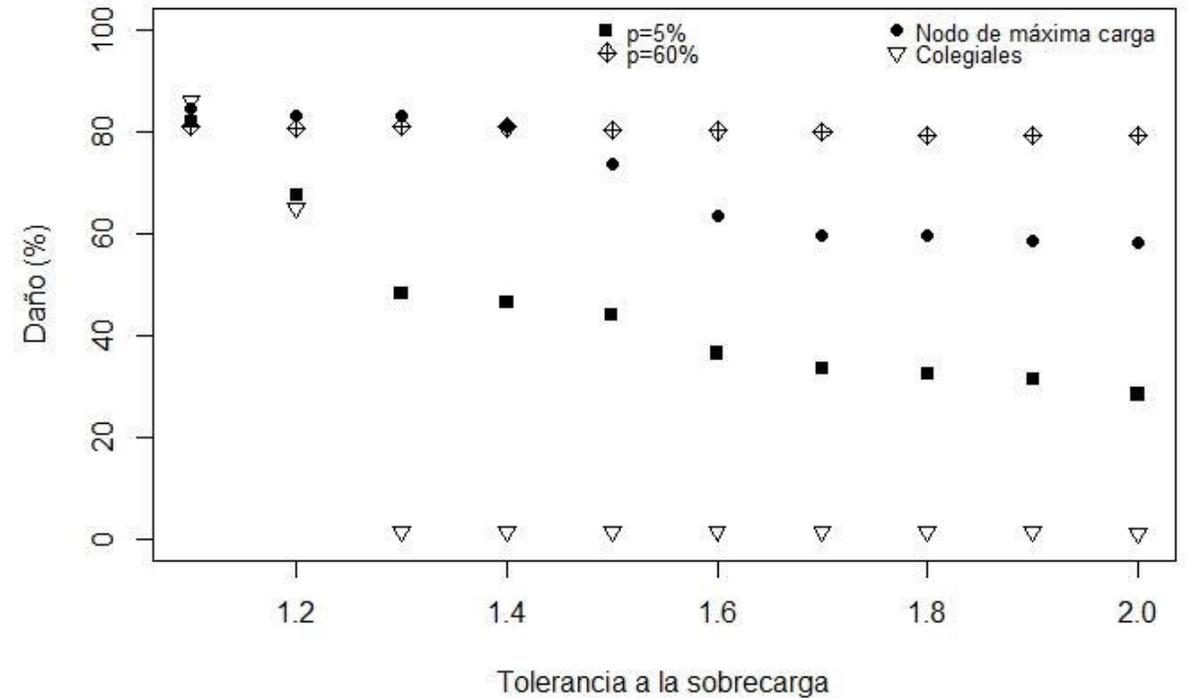
ALGUNOS RESULTADOS COMPARADOS:

Magnitud del daño bajo distintos tipos de perturbaciones. En función del parámetro de tolerancia a la sobrecarga (α), se muestran los resultados de pérdida de eficiencia global de cada red, para *shocks* aleatorios de proporciones removidas al azar (p) de 5% y 60%, en comparación con *shocks* intencionales.

SADI - Resultados según tipo de shock



GCABA - Resultados según tipo de shock

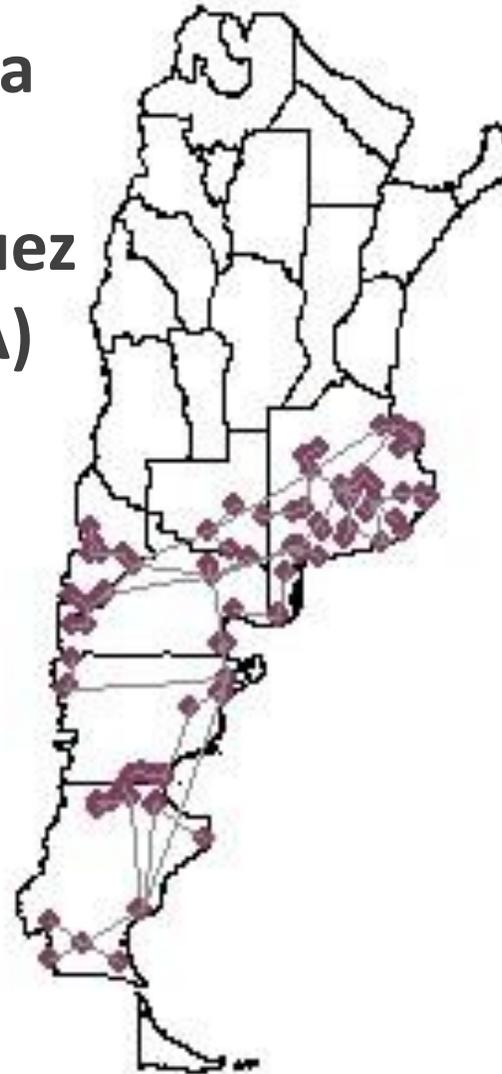


COMPONENTE GIGANTE FINAL

$p=5\%$



**Nodo
máxima
carga
(Rodríguez
en PBA)**



Resistencia





- ❖ ¿Qué pasó? -> Dejaron fuera de servicio la línea de 500kV Colonia Elía-Campana por arreglos, pasaron todo por la línea Colonia Elía-Belgrano y, cuando vino el “*shock*”, no resistió. Los controles no fueron suficientes (¿fallaron?)
- ❖ Colonia Elía – Campana – Belgrano
- ❖ Remoción de a uno: resultados similares a retirar el nodo de máxima carga; Belgrano similar, salvo para $\alpha \geq 1,65$; siempre queda inmediatamente sobrecargado alguno de los otros dos.
- ❖ Remoción de a pares, el tercer nodo no se sobrecarga inmediatamente o siquiera en ningún momento del proceso de ajuste.
- ❖ Red heterógena -> nodos de mayor grado son también los nodos de mayor intermediación (lógica en la construcción de la red argentina)
- ❖ ¿Redundancia?
- ❖ Otras hipótesis



Componente gigante (caso Colonia Elía)



Reflexiones finales

Conclusiones

- ❖ *La topología de las redes es importante para el funcionamiento del sistema (redes estáticas, condiciones físicas, costo económico, tiempo) -> tomar en cuenta los estudios realizados a la hora de futuros diseños/modificaciones de diseños existentes*
- ❖ *Redes “mundo pequeño”: la energía se transmite más “rápidamente” que en otras clases de redes, pero también los shocks se expanden con mayor facilidad (daño de perturbaciones aleatorias es menor a desperfectos en nodos centrales)*

Recomendaciones

- ❖ *Difíciles cambios, por costos, geografía, condiciones “naturales e intrínsecas”*
- ❖ *Redistribución de la carga*
- ❖ *Fortalecimiento de los vínculos entre localidades alejadas y principales centros de actividad y abastecimiento*
- ❖ *Más fuentes locales de generación*
- ❖ *Perfeccionar monitoreo y control*
- ❖ *Ampliar capacidad instalada (estructural) de los nodos más centrales*

¡MUCHAS GRACIAS!

ayelenbargados@gmail.com