

Análisis de vulnerabilidades e interrupciones del sistema argentino de interconexión

RESUMO

Este artículo aborda los factores que originan apagones, haciendo énfasis en aquellos producidos en el Sistema Argentino de Interconexión (SADI). El problema de investigación elegido es ¿Cuáles han sido las vulnerabilidades que explican los factores que originaron las fallas de suministro eléctrico en Argentina, particularmente con referencia al evento del 16 de junio de 2019? El objetivo principal del análisis es explicar los factores que provocan estos fenómenos. La metodología de trabajo se fundamenta en un estudio descriptivo analítico de caso. Luego de analizar las etapas del SADI, se abordan los apagones más importantes ocurridos en el país, fundamentalmente el apagón del 16 de junio de 2019. Se expone que este fue un evento excepcional debido al fracaso de los sistemas de seguridad y que los factores operativos fueron los que acentuaron la magnitud de los apagones. Finalmente, se convoca a considerar del SADI como infraestructura crítica y se proponen áreas de estudio futuras.

PALABRAS-CLAVE: Sistemas Argentino de Interconexión. Apagón. Vulnerabilidades. Fallos.

Duilio Lorenzo Calcagno
dcalcagno@mendoza-conicet.gob.ar

Investigador Asistente Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Profesor Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza

María Lucía Cantos Cornejo
luciacantoscornejo@gmail.com
Ingeniera Industrial Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Cuyo

Pedro Alejandro Baziuk
pedro.baziuk@ingenieria.uncuyo.edu.ar
Profesor Facultad de Ciencias Económicas y Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Cuyo.

INTRODUCCIÓN

El siguiente artículo presenta una contribución en la literatura que aborda los factores que desencadenan interrupciones en el suministro eléctrico, también conocidas como apagones, haciendo énfasis en aquellos producidos en el Sistema Argentino de Interconexión (de aquí en más, SADI). Los apagones ocurridos en Argentina, especialmente a partir de un análisis sistemático de sus causas, han sido poco estudiados. Es por esto que, en el presente artículo, se analizarán los apagones más importantes producidos en el país, con particular atención en el evento ocurrido el 16 de junio de 2019.

En este marco, el problema de investigación que se aborda es ¿Cuáles han sido las vulnerabilidades que explican los factores que originaron las fallas de suministro eléctrico en Argentina, particularmente con referencia al evento del 16 de junio de 2019? El objetivo principal del análisis es identificar dichas vulnerabilidades para explicar los factores que desencadenan estos fenómenos e indagar si existen patrones comunes respecto de dichas causas. Esto reviste no solamente una relevancia en términos académicos. La importancia de prevenir la interrupción del suministro eléctrico también radica en que el desarrollo de las sociedades contemporáneas se sustenta en la provisión de energía eléctrica, la cual es considerada como un suministro crítico.

El corte del abastecimiento eléctrico afecta de manera directa el funcionamiento de un país: el control y la seguridad de las fronteras, la prestación de servicios de salud, las comunicaciones, la industria y la producción y, hasta la propia estabilidad social, dependen de un suministro continuo, seguro y confiable de este servicio (MAZUR, 2013). Esta relación entre electricidad y sociedad se enmarca, a su vez, en la estrecha interrelación de las sociedades contemporáneas y la explotación y consumo de energía en sus diversas fuentes y usos finales (JOHNSON, 2018).

En este sentido, este análisis contribuye particularmente al estudio de las vulnerabilidades del SADI y las potenciales fallas asociadas que, en ciertas circunstancias, pueden generar apagones más o menos extendidos. Ello resulta de suma utilidad para el ámbito de la toma de decisiones en materia de políticas públicas relacionadas con la prevención, la ejecución o rediseño de medidas de control del sistema, y la evaluación de los diversos factores que intervienen en el mismo. En todos los casos, este tipo de estudios también contribuye al diseño de protocolos de actuación que permitan tomar control de las diversas situaciones a fin de restablecer el servicio en el menor tiempo posible. En el marco de la literatura específica sobre factores causales de apagones, el caso argentino ha sido poco estudiado hasta el presente.

METODOLOGÍA

La metodología de trabajo se fundamenta en un estudio descriptivo analítico de caso (Yin, 2014). Esta opción metodológica está justificada puesto que el estudio cumple con los tres requisitos que sugiere Yin: poseer preguntas del tipo “por qué” o “cómo”, tener escaso o nulo control sobre los eventos y abordar realidades contemporáneas en un contexto de vida real (Yin, 2014). En síntesis, el estudio de caso es entendido fundamentalmente como la “descripción y el análisis en profundidad de un sistema acotado” (Creswell, 2007; Merriam, 2011).

En cuanto a la distribución de las partes de este artículo, luego de esta Introducción, la sección 2 presenta un análisis de las etapas que abarca el SADI. La sección 3 hace referencia al funcionamiento y operación del SADI. Allí se describen los sistemas de control con los que cuenta. En la sección 4 se analizan los apagones más importantes ocurridos en Argentina así como las causas que los generaron. La sección 5, por su parte, se enfoca específicamente en el apagón producido el 16 de junio de 2019, el cual afectó no sólo a Argentina, sino también a Uruguay y Paraguay. En ese punto, se describen las causas que produjeron el colapso total del sistema eléctrico argentino, así como los factores que pueden contribuir a la producción de un fallo en cascada de esta magnitud. En la sección 6 se describe como se realizó el restablecimiento del suministro de energía y la recuperación del SADI luego de este evento. Luego, en la sección 7 se analiza el evento anteriormente nombrado desde el punto de vista de falla en cascada. En la sección 8 se analizan las vulnerabilidades del SADI a partir de una recapitulación de los apagones producidos en el país en los últimos años. Se finaliza con las Conclusiones, en las cuales se sugieren algunas líneas de trabajo futuras en la materia.

DESARROLLO

Sistema Argentino de Interconexión

El SADI es una red eléctrica conformada por tendidos de alta tensión que interconecta las distintas regiones de Argentina. Técnicamente, es la red que recolecta y distribuye toda la energía que se genera en -prácticamente- todo el país. Se trata del fruto de una obra que se desarrolló entre 2004 y 2014 (CLARÍN, 2018), con el objetivo de que todo el país estuviera conectado por un sistema eléctrico común y único. Esto ha permitido al Estado argentino tener un mayor control sobre el sistema eléctrico nacional, mejorar su funcionamiento y evitar fallas que se pudieran producir como resultado de la conexión de sistemas eléctricos regionales sometidos a diferentes regulaciones. Con anterioridad al establecimiento del SADI estos últimos, al ser conectados en un sistema común, podían presentar incompatibilidades que afectan su funcionamiento. El SADI se encuentra administrado y regulado por el Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE) y por la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima (CAMMESA, 2020a).

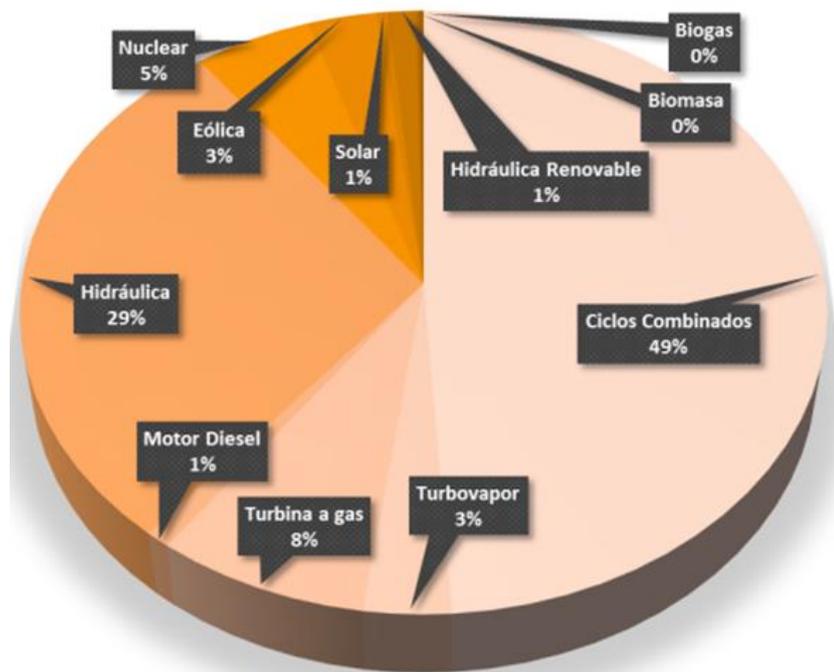
Actualmente, si bien el sistema permite conectar casi todo el territorio argentino, la parte argentina de la isla de Tierra del Fuego (Provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur) ha quedado excluida del mismo. El motivo de esta situación corresponde al elevado costo que hubiera insumido el tendido eléctrico necesario para permitir la conexión de esa provincia isleña con el resto del país.

Este sistema involucra todas las etapas de la generación y distribución energética de esta particular cadena de suministro. La misma puede subdividirse en cuatro etapas:

- Etapa 1: generación

En esta etapa se lleva adelante la generación de la electricidad a partir de cualquier tipo de fuente, ya sea renovable o no renovable. Actualmente, en el país hay 105 plantas generadoras. Según datos publicados en el mes de febrero de 2020, Argentina posee una potencia instalada de 40020 MW (CAMMESA, 2020b), la cual proviene de las fuentes descriptas en la Imagen 1.

Imagen 1



Fuente: CAMMESA, 2020b.

- Etapa 2: transporte

En esta instancia se produce el transporte de alta tensión de la energía, desde las plantas generadoras hasta las subestaciones de distribución. El transporte se lleva a cabo a una tensión de 500 kV, 330 kV, 220 kV y 132 kV. Un aspecto fundamental de la etapa del transporte es que se busca reducir al mínimo las pérdidas. Es por ello que, a partir de un transformador de tensión, se eleva la misma para reducir la corriente de transporte y, consecuentemente, las pérdidas en las líneas.

Es importante aclarar que, a partir de esta instancia, existen dos destinos posibles: el primero consiste en la energía destinada a los pequeños consumidores por medio de las líneas de distribución. En segundo lugar, existen los grandes consumidores tales como las fábricas de industria pesada, los cuales toman energía directamente de las líneas de alta tensión.

- Etapa 3: distribución

En esta etapa se produce la distribución de energía desde las subestaciones hasta los barrios o las industrias a través de líneas de media tensión, cuya reducción se lleva a cabo en las subestaciones mediante transformadores de tensión (33 o 13,2 kV). Actualmente, Argentina cuenta con setenta y cuatro distribuidoras encargadas de este eslabón específico de la cadena de suministro.

- Etapa 4: consumidores o clientes finales.

Este último momento consiste en la llegada de la energía eléctrica a los consumidores o clientes finales, los hogares particulares. Estos reciben la energía eléctrica con una tensión de 220-240 V, mientras que las industrias generales lo hacen a 380-410 V. Las plantas de industria pesada, que requieren de una tensión mayor, lo hacen a 33 KV.

Funcionamiento del SADI

El SADI funciona bajo el concepto de equilibrio (Lopetegui, 2019), según el cual la oferta y la demanda deben permanecer iguales para que la frecuencia no se vea modificada. En Argentina, la frecuencia utilizada es de 50 Hz con una tolerancia de $\pm 0,2$ Hz. El mantenimiento de la frecuencia en estos valores, permite que las generadoras se mantengan en sincronismo con el sistema y que, de esta manera, la transmisión energética pueda funcionar correctamente.

El SADI cuenta con dos sistemas de protección automáticos: uno dedicado a la seguridad de los equipos y otro a la protección de la seguridad del sistema. Este último se divide en dos tipos (Lopetegui, 2019):

- Desconexión Automática de Generación (DAG): este sistema actúa cuando la oferta es superior a la demanda. Lo que hace es desconectar de manera inteligente y automática las generadoras para compensar el equilibrio luego de una falla. Su gestión y operación es realizada por las transportistas.

En el país se encuentran cuatro sistemas DAG que actúan en las líneas troncales del SADI que son responsabilidad de las transportistas: DAG NEA (noreste argentinoⁱ), DAG NOA (noroeste argentinoⁱⁱ), DAG Comahueⁱⁱⁱ y DAG Gran Mendoza^{iv}. Por otro lado, también existen DAG regionales en líneas de media tensión, en este caso, responsabilidad de las distribuidoras.

- Esquema de alivio de cargas por subfrecuencias. Estos sistemas, instalados en las distribuidoras como relees, actúan cuando la demanda es superior a la oferta. De esta manera, las distribuidoras acuerdan con CAMMESA las condiciones bajo las cuales, están autorizadas a desconectar un cierto porcentaje de la demanda.

Análisis de apagones en Argentina

En esta instancia se aborda dos ejemplos de apagones de gran envergadura en Argentina. Para el análisis de los mismos, se recurre a información oficial de las entidades involucradas y a notas periodísticas de diarios en línea. Fueron seleccionados para su estudio aquellos apagones que se destacaron por la cantidad de usuarios o consumidores afectados. Como se adelantó en la Introducción, el objetivo de la consulta de estos episodios pasados en Argentina, junto con el más reciente ocurrido en 2019, consiste en realizar una comparación entre ellos de manera de verificar si existen factores causantes comunes en relación con las vulnerabilidades del sistema.

Antes de comenzar el análisis de apagones ocurridos en Argentina, se debe definir el concepto de apagón. Este fenómeno consiste en la interrupción del suministro eléctrico por tiempo determinado o indeterminado y que puede ser causado por cinco tipos de factores. En este sentido, los apagones ocurridos en

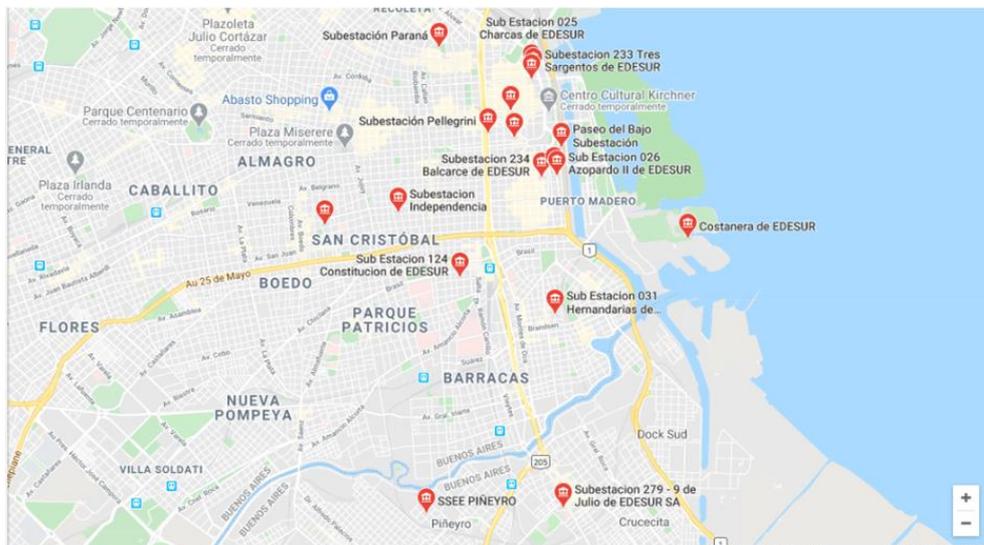
Argentina, se analizarán a partir de la clasificación de factores que se proponen en Bo et al (2015) contextualizándolos a nivel internacional:

- Factores externos: incluyen desastres naturales y condiciones climáticas extremas. Un ejemplo de apagón eléctrico causado por desastres naturales es el ocurrido en el noreste de Estados Unidos en el año 2012 como resultado del paso del huracán Sandy. Este huracán produjo fuertes daños en las líneas y torres del sistema eléctrico, dejando así un total de 5.200.000 de personas sin suministro eléctrico (ARROYO, 2012).
- Factores tecnológicos: tienen que ver con fallas en los equipos, en las líneas y hasta fallas causadas por estructuras inadecuadas. Un ejemplo de apagones ocurridos por estructuras inadecuadas, es el de India en el año 2012. El fallo fue producto de la debilidad y la sobredimensión de la red eléctrica para el caudal energético del país. El apagón afectó a 600.000.000 de personas (EL MUNDO, 2012).
- Factores operativos: hacen referencia a los errores humanos vinculados a la operación del sistema eléctrico, ya sea en las centrales generadoras, como en subestaciones, distribuidoras y transportadoras. Un ejemplo de apagones causados por estos factores es el caso del apagón en el año 2005 en Los Ángeles, Estados Unidos. Este fue producido por error de un operario en la conexión de una línea, generando la activación del sistema automático preventivo que llevó a la producción de apagones en cadena. El apagón dejó sin suministro eléctrico a la ciudad de Los Ángeles por dos horas (EL PAÍS, 2012).
- Factores de mercado: incluyen los mecanismos de la red eléctrica como los sistemas de tarifas y regulatorios.
- Factores intencionales: hacen referencia a los hechos vandálicos que se producen en instalaciones eléctricas como torres o líneas, que tienen por objeto un daño intencional de las instalaciones de la interrupción del suministro eléctrico. Además, dentro de esta categoría podrían incluirse los ciberataques que, si bien tienen el mismo fin que los anteriormente mencionados, requieren de una operación más compleja.

Argentina cuenta con dos apagones históricos de gran envergadura antes del gran evento de 2019. Los mismos ocurrieron en los años 1999 y 2002 (DELL'ORO, 2019). El primer caso se trató del apagón de febrero de 1999, el cual afectó a aproximadamente 160.000 personas en la provincia de Buenos Aires y se extendió durante 11 días. El mismo fue producto de un incendio en la subestación generadora subterránea de Azopardo, ubicada en San Telmo.

La generadora Azopardo, inaugurada en el año 1999, fue considerada en ese momento como la subestación más grande de América Latina, con una potencia instalada de 600 MW (ver ubicación en Imagen 2). Su función era el abastecimiento de 1.200.000 personas en el microcentro de Buenos Aires (LA NACIÓN, 1999).

Imagen 2



Fuente: Google Maps, 2020.

La subestación Azopardo sufrió un incendio el 15 de febrero de 1999, luego de que se realizara un empalme eléctrico de alta tensión entre cableado nuevo y el antiguo. Lo que ocurrió fue una falla en los cables nuevos que se encontraban aislados con aceite. Al sobrecalentarse la línea se produjo la combustión del aceite, lo que generó así la destrucción del tendido principal de 220 kV y de algunos de 132 kV.

Edesur^y, empresa responsable de la subestación, al comenzar la reparación de las líneas, se encontró con que los cables suministrados por su proveedor, contenían una falla de fabricación. Es por ello que la restitución del servicio se vio retrasada durante varias horas.

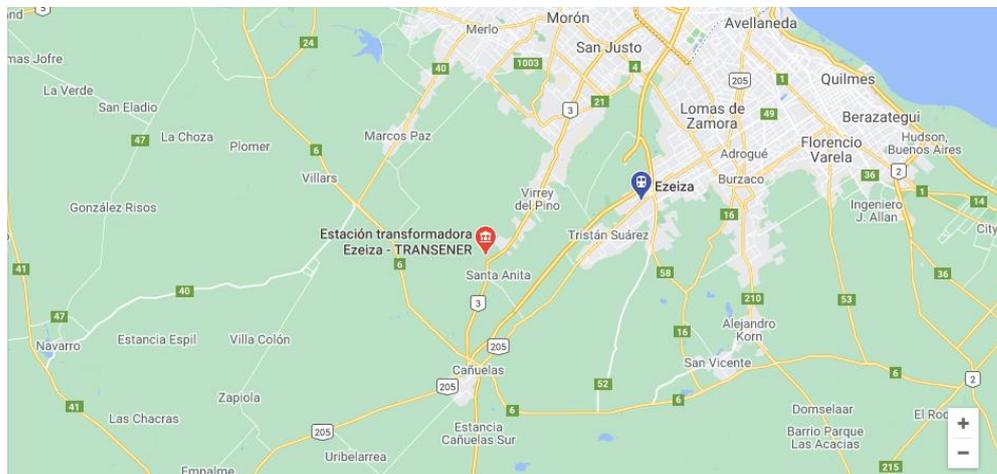
Este apagón, aparentemente, fue resultado de factores externos y operativos. Los factores primeros estuvieron relacionados con las fallas de fabricación de los cables adquiridos, lo cual habría sido el evento iniciante de la falla. Por otro lado, los factores operativos, se debieron a que el empalme fue realizado sin la supervisión de un jefe de obras, sumado a que luego de su realización no se encontraba presentes ningún personal de la planta que pudiera advertir el desperfecto y, de esa manera, evitar el incendio (RUDNICK, DÍAZ y ZAMORANO, 1999).

Por otro lado, el apagón de noviembre de 2002 fue, hasta 2019, el episodio de este tipo más importante en Argentina según la cantidad de usuarios afectados. Este se extendió durante 4 horas aproximadamente, afectando a casi toda la Capital Federal, el Conurbano Bonaerense, Córdoba, La Pampa, Neuquén, Río Negro y Santa Fe, dejando un total de 13.000.000 de habitantes sin suministro eléctrico.

La falla que originó este apagón fue generada por la explosión de un transformador en la estación Ezeiza (ver Imagen 3), la que recibe la energía de las centrales hidroeléctricas de El Chocón, Alicurá, Piedra del Águila y Cerros Colorados, lo cual representaba el 25% de la energía que se estaba consumiendo en el país en ese momento. Los factores desencadenantes fueron externos y tecnológicos, dado que la falla del transformador pudo ser favorecida por el

elevado consumo energético, ya que la temperatura de ese día alcanzó los 35 °C (CARBAJAL, 2012).

Imagen 3



Fuente: Google Maps, 2020

Apagón 2019

El 16 de junio de 2019, se produjo un apagón masivo que afectó a prácticamente todo el territorio argentino, como se explicó en la Introducción. Asimismo, las fallas que se produjeron en el SADI, tuvieron repercusiones tanto en Uruguay como en Paraguay. Parte de los territorios de estos países quedaron sin suministro eléctrico, aunque por un período de tiempo menor que en la Argentina.

En este apartado, primeramente, se describe la situación en la que se encontraba el SADI en los momentos previos a las fallas. Luego, se aborda los factores que llevaron a que se produjera este apagón sin precedentes en el país. Como se comentó anteriormente, para este abordaje se sigue la clasificación de las causas que provocan apagones eléctricos, detallado anteriormente en Bo et al, 2015.

Dos meses antes del apagón, se llevaron adelante obras en la línea Colonia Elía-Campana para trasladar la torre número 412 100 metros, ya que la misma presentaba peligro de colapso como consecuencia de que el río Paraná Guazú destruyó los cimientos sobre los que se encontraba la torre. Esto se debió a que el cauce del río se fue desplazando con el paso del tiempo, hasta una distancia que ya era considerada peligrosa para la seguridad de la instalación. Por ello, Trensener S.A.^{vi} decidió realizar un bypass en la línea, durante el tiempo que durara la obra con el objetivo de asegurar el suministro energético en la zona.

La línea Colonia Elía-Campana se ubica entre las provincias de Entre Ríos y Buenos Aires y transmite energía eléctrica desde Salto Grande hacia el área Litoral-Buenos Aires, como puede observarse en la imagen 4. Esta línea corresponde a un corredor de 500 kV.

Imagen 4

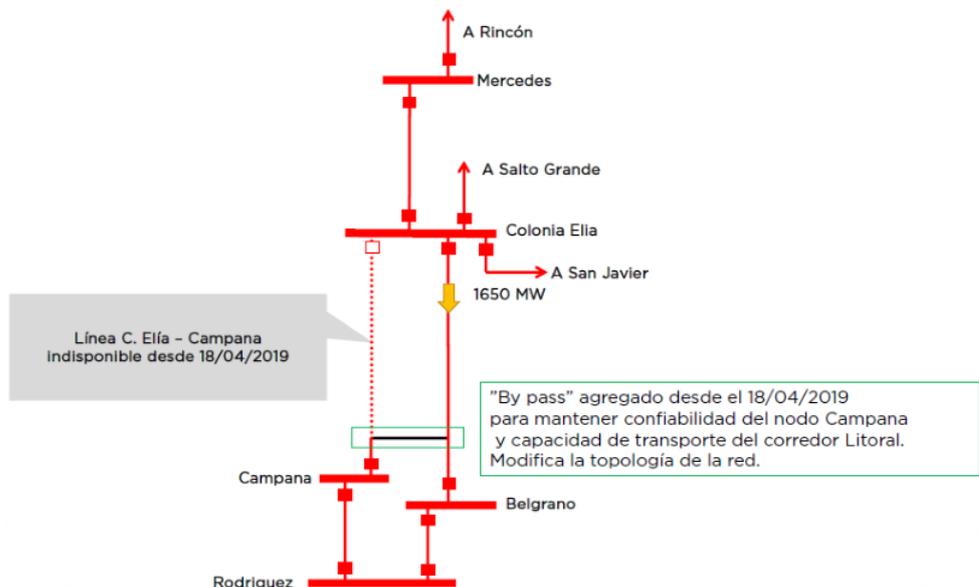


Fuente: CAMMESA, 2020b.

Debido al gran caudal de energía que se transporta por esta línea, la línea Colonia Elía-Campana posee una paralela denominada línea Colonia Elía-Belgrano, y juntas forman parte del Corredor del Litoral-Buenos Aires.

En efecto, la realización del bypass consistió en retirar de servicio la línea Colonia Elía-Campana, y conectar mediante un bypass la línea Colonia Elía-Belgrano y el nodo Campana, de manera de no interrumpir el suministro energético a esta zona fabril tan importante. Esta obra generó una modificación de la topología de la red, como se puede observar en la imagen 5.

Imagen 5



Fuente: Lopetegui, 2019

Es importante aclarar, que el apagón ocurrió un día domingo a las 7:06 am hora Argentina, con una demanda energética 30% menor que un día normal, como se describe en Lopetegui (2019). Esto quiere decir que la condición del sistema en ese momento se encontraba en un estado de equilibrio inestable causado por la menor demanda.

En ese momento se estaban importando e ingresando a la red 1780 MW de Yacyretá^{vii} (Paraguay), 900 MW de Salto Grande^{viii} y 1000 MW de Garabí (Brasil) (LOPETEGUI, 2019) como puede observarse en la Imagen 6. La energía proveniente de Brasil forma parte de un acuerdo de intercambio energético entre Argentina y ese país. El acuerdo consiste en el intercambio de electricidad sin compensación en dinero, quiere decir que los países pueden importar energía durante tiempos de necesidad y luego están obligados a devolverla en un futuro intercambio (BNAMERICAS, 2016).

Imagen 6



Fuente: Lopetegui (2019)

La falla que desencadenó el apagón fue un cortocircuito en la línea Colonia Elía-Belgrano, que condujo a la salida de servicio de la línea y generó la desconexión de la demanda de los nodos Campana y Belgrano. A su vez, ello contribuyó a la desestabilización del sistema debido a un exceso de oferta.

En ese momento, debió haber actuado la DAG del NEA para poder subsanar el desequilibrio y evitar una cadena de fallas. La DAG debió desconectar del sistema 1200 MW, provenientes de Yacyretá y Salto Grande, pero esto no ocurrió debido a que durante la realización del bypass y por consiguiente la modificación topológica de la red, no se realizó la reprogramación de la DAG. Por lo tanto, el desequilibrio se mantuvo debido a un exceso de oferta.

Al encontrarse la frecuencia por debajo de los valores normales de operación se produjo una pérdida de sincronismo del SADI con las generadoras de Yacyretá y Salto Grande, lo que desembocó en la formación de una isla^{ix} que contenía a las dos generadoras, la provincia de Misiones y parte de Uruguay. De esta manera se eliminó del SADI una oferta de 3200 MW. El problema radicó en que esta desconexión se llevó a cabo de manera prematura, esto quiere decir que las generadoras salieron de servicio cuando la caída de la frecuencia alcanzó valores todavía seguros de operación. Como resultado, se llegó a una nueva situación de desequilibrio.

En este nuevo escenario, el desequilibrio se debió a un exceso de demanda. Por tanto, se activaron los sistemas de alivio de tensiones de las generadoras, desconectando la demanda del sistema para reestablecer el equilibrio. Lo que sucedió fue que, de las setenta y cuatro generadoras, sesenta y nueve salieron de servicio de manera temprana. Es decir, se desconectaron a un valor de frecuencia donde todavía era seguro operar. Sumado a lo anterior, esta desconexión de demanda se realizó en un 20% inferior al que debería haber sido realizado. Esto llevó inevitablemente a que todas las distribuidoras se desconectarán finalmente como medida de protección por baja frecuencia. Esta situación, finalmente, llevó al colapso total del SADI en sólo 30 segundos.

Luego de esta narración analítica, se clasifican a continuación los factores causantes del apagón en cuatro categorías, de acuerdo con la distinción de Bo et al (2015), ya que el factor intencional fue descartado como causante del hecho: factores externos, tecnológicos, operativos y de mercado, los cuales se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1

FACTORES	HECHOS
Externos	<ul style="list-style-type: none"> • Cauce de un río generó el traslado de la torre 412 de la línea Colonia Elía-Campana.
Tecnológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Bypass y cambio de topología. • Cortocircuito en la línea Colonia Elía-Belgrano.
Operativos o gestión	<ul style="list-style-type: none"> • DAG del NEA no fue reprogramada. • Desconexión prematura de las generadoras, al formarse la isla.

	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuidoras se desconectaron prematuramente. • Distribuidoras desconectaron 20% menos de la demanda que deberían haber desconectado.
Mercado	<ul style="list-style-type: none"> • La demanda en el momento del apagón, era un 30% menor que en un día común.

Fuente: Adaptación propia a partir de Bo et al (2015).

Para poder explicar el motivo que llevó a que Uruguay y Paraguay quedaran sin suministro eléctrico, se debe aclarar que las centrales hidroeléctricas Yacretá y Salto Grande son generadoras binacionales. En primer lugar, Yacretá suministra energía eléctrica a Paraguay y Argentina, mientras que Salto Grande hace lo propio con Uruguay y Argentina.

Al formarse la isla que condujo a la separación de las generadoras mencionadas del resto del SADI, se produjo la salida de servicio de las mismas. Esto llevó al corte del suministro energético de las zonas abastecidas por las binacionales, lo que incluyó a los países vecinos.

Recuperación

La recuperación completa del SADI demoró catorce horas. La misma comenzó por los generadores que no necesitaban suministro externo, y que podían iniciarse solos como en el caso de algunas centrales térmicas e hidroeléctricas. De esta manera, al comenzar la generación, se fue inyectando energía a la red para que el resto de las generadoras pudieran comenzar a producir nuevamente y, por consiguiente, inyectaran energía a la red.

En este marco, las centrales nucleares exhibieron un comportamiento diferenciado ya que, cuando las mismas son llevadas a una parada segura, requieren de 48 h. de desintoxicación para poder entrar nuevamente en funcionamiento. Es decir que, si bien se recuperó el suministro energético luego de 14 h., el sistema volvió a la normalidad recién varias horas después.

La reactivación del SADI comenzó con la generación en la Costa Atlántica y la toma de carga de Salto Grande. Luego, se reactivaron las primeras centrales hidroeléctricas del Litoral y unos minutos más tarde entraron en servicio las hidroeléctricas del NEA y Cuyo suministrando poco a poco energía a la red nuevamente. Con el pasar del tiempo, entraron en servicio las centrales térmicas e hidroeléctricas del resto de las regiones del país.

La recuperación total del suministro eléctrico se fue dando por regiones, la primera zona en recuperar el servicio al 100% fue el Litoral, luego Cuyo, el NEA, GBA, Centro, Patagonia, el NOA, provincia de Buenos Aires y, finalmente, la región del Comahue.

Análisis de fallo en cascada

Por lo general, los apagones totales como el que ocurrió en Argentina en junio de 2019 no son producidos por una falla aislada, sino que suele existir un evento

iniciante o falla iniciante que provoca nuevas fallas en cadena con efectos multiplicadores. En el caso de que no exista una contención a tiempo de la sucesión de causas y efectos, los eventos pueden llevar al colapso total del sistema eléctrico.

La primera causa de fallo en cascada a analizar es la topología, la cual fue descrita en Dey et al (2016) como una de las principales causas de este tipo de fallos debido a la importancia que reviste para el funcionamiento de la red. La topología consiste en la disposición de los nodos de una red eléctrica, así como también la manera en la que estos nodos se conectan entre sí. Esto se debe a que las modificaciones que se produzcan en ella, ya sea voluntarias o como resultado de fallas, pueden conducir a desequilibrios de la red y hasta a apagones, en los casos más graves.

Al producirse una falla en una línea o un nodo, además de modificarse la topología, el sistema procede a la formación de islas como medida de protección. Como resultado de esto, al desconectarse una parte del sistema, el flujo tiende a redistribuirse en las líneas que continúan activas. De esta manera, se presentan dos escenarios:

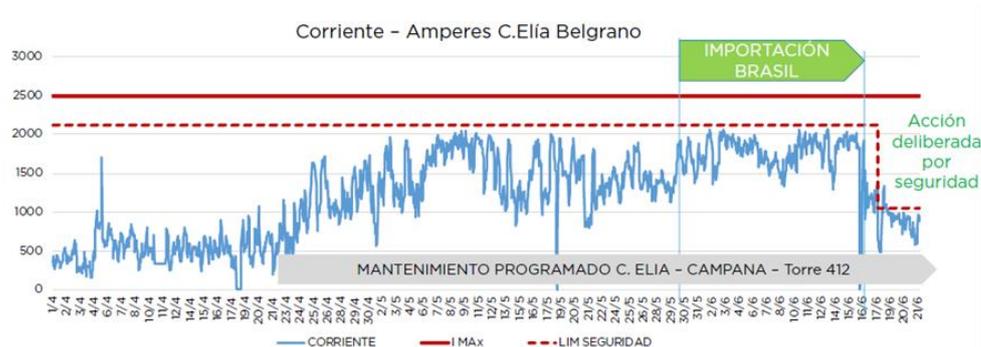
1. El flujo se recalcula y comienza a circular en las líneas activas, no generando ninguna falla debido a que el flujo que va a circular por las líneas es inferior al límite de capacidad de la misma.
2. El flujo que circula por las líneas, supera el límite de capacidad de las mismas, generando una sobrecarga de las líneas.

Para que el segundo escenario no ocurra, es muy importante que los diseños de las redes sean adecuados y robustos. Por lo general, las líneas se suelen calcular con un factor de seguridad de 1,2, pero este valor depende específicamente del sistema, de su diseño y de la zona evaluada. Además, también existen factores climáticos, tales como las altas temperaturas, que pueden contribuir a una falla de este tipo.

Siguiendo el caso de estudio de este trabajo, se pueden hacer algunas observaciones en cuanto a lo mencionado anteriormente sobre el apagón argentino de 2019. Al realizarse el bypass de la línea Colonia Elía-Campana, se produjo una modificación de la topología no por causa de una falla, sino por una obra civil programada por Transener. En definitiva, esta modificación llevó a que toda la energía eléctrica que circulaba por estas dos líneas, pasara a circular por una sola.

Normalmente, por esas líneas circulaban en promedio 600 Amperes aproximadamente. Luego del bypass la línea activa pasó a transportar un promedio de 1500 Amperes, con picos de hasta 2000 Amperes. Este valor se encuentra apenas por debajo del límite de seguridad (que es un 18% de la capacidad máxima de la línea) y lejos de los 2500 Amperes que representan la capacidad máxima, como se muestra en la imagen 7. De esta manera, se puede demostrar que la modificación de la topología de la red influyó en el desenlace del apagón. Sin embargo, no fue la causante de la misma, dado que aún con la modificación topológica, no se generó una sobrecarga de la línea por la robustez de la misma.

Imagen 7



Fuente: Lopetegui, 2019

La contribución de la modificación topológica de la red al apagón se debió a que, una vez realizado el bypass de la línea, los parámetros de la red se vieron modificados. Esta modificación obliga a variar los parámetros de activación de los sistemas de seguridad, en este caso la DAG del NEA, para que el mismo pueda actuar en forma adecuada y oportuna. Sin embargo, la reprogramación del Sistema de Seguridad no se llevó a cabo. Al no realizarse esto por un error operativo de la empresa transportista que gestiona el sistema, la DAG del NEA no fue capaz de prevenir el fallo en cadena.

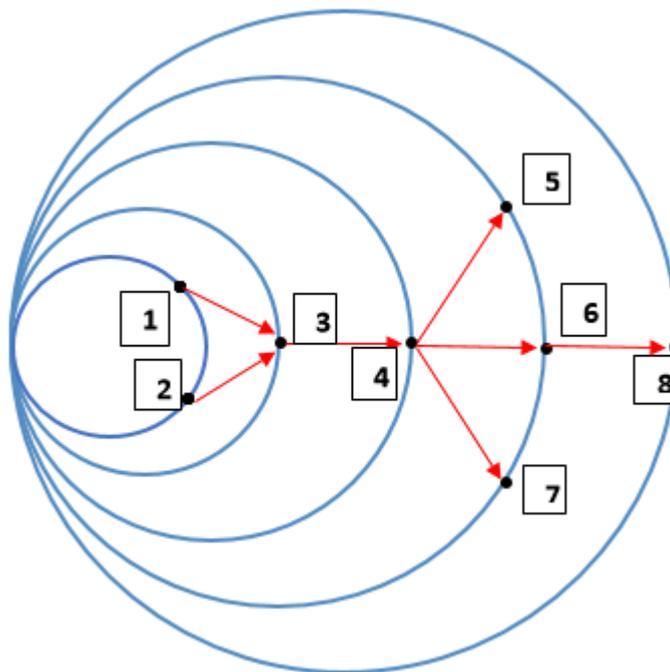
A continuación, se representa gráficamente la secuencia del fallo en cadena, para lo cual en la tabla 2 se asigna a cada fallo un número, el cual es representado luego en el gráfico de la Imagen 8.

Tabla 2

N°	FALLO
1	Cortocircuito línea Colonia Elía-Belgrano
2	No reprogramación de la DAG
3	No actuación de la DAG del NEA
4	Formación de la isla que se desconecta del SADI
5	Apagón Paraguay
6	Desconexión temprana e insuficiente de la demanda
7	Apagón Uruguay
8	Colapso total del SADI

Fuente: producción propia.

Imagen 8



Fuente: Producción propia

En definitiva, de este análisis se puede concluir que, si bien existió un error operativo que consistió en la no reprogramación de la DAG, el evento iniciante del fallo en cadena fue un cortocircuito aleatorio. Esto quiere decir que si el cortocircuito no se hubiera producido probablemente no hubiera existido el apagón.

Por otro lado, se debe hacer énfasis en que todos los fallos consecutivos que se produjeron fueron de tipo operativo. Se los detalla a continuación:

1. La no reprogramación de la DAG del NEA
2. Una décima parte de las empresas generadoras (equivalente a 5), al momento de formarse la isla, salieron de servicio antes de tiempo.
3. De las 74 distribuidoras activas, 69 desconectaron la demanda de manera prematura y lo hicieron un 20% menos de lo que lo deberían haber hecho.

Si bien los protocolos de actuación para estas situaciones existen, fueron escasas las veces que se cumplieron. Si se hubieran realizado los controles correspondientes, ya sea por el estado como por las empresas transportistas y distribuidoras, el apagón podría haber sido evitado. Estos controles van desde la empresa transportista que debió haber controlado que se hiciera la reprogramación de la DAG, hasta los controles que debieron realizar las distribuidoras y generadoras en la configuración de sus sistemas, de manera de que la desconexión en caso de emergencia se realice como se indica en los protocolos acordados con CAMMESA.

Vulnerabilidades del SADI

Siguiendo lo descrito en Bernstein et al (2012), por lo general, se consideran como vulnerabilidades comunes de las redes de energía eléctrica:

- La sobretensión debido a la capacidad de las líneas eléctricas.
- Los factores climáticos como elevadas temperaturas, ya que estos generan disminuciones en las eficiencias de los generadores reduciendo así su capacidad.
- Los daños causados por desastres naturales como tsunamis, huracanes e inundaciones.

En el caso de Argentina, los fallos que han desembocado en apagones se han debido principalmente a factores climáticos, desastres naturales y vandalismo. Entre ellos se pueden destacar inundaciones, incendios, tornados, terremotos, tormentas de nieve y tormentas eléctricas.

Estos desastres naturales y factores climáticos, generan en el sistema eléctrico una gran variedad de efectos, cuya severidad o daño causado depende exclusivamente de la magnitud de los factores. Como resultado, se pueden producir desde cortocircuitos fácilmente subsanables en las líneas, hasta daños en las subestaciones, caída de torres, etc. En el último y principal caso de estudio de esta investigación se puede observar que hay un factor que no ha sido nombrado anteriormente y que fue, en definitiva, el causante principal del apagón. Este factor es el humano.

Argentina tuvo, con anterioridad al apagón del 2019, una vulnerabilidad operativa muy grande. Esto quiere decir que, si bien existían los protocolos de acción y que, además, los mismos fueron aprobados y habían nacido del consenso del Estado con las empresas transportistas, generadoras y distribuidoras, los mismos no fueron cumplidos acabadamente.

Conclusión

Se ha expuesto que los factores desencadenantes de apagones son muy diversos. Los mismos dependen de una gran variedad de situaciones, algunas de ellas externas al sistema de distribución y a su funcionamiento, como puede ser situaciones climáticas adversas. En este sentido, si bien hay factores que generan fallos en los sistemas eléctricos que no pueden ser predichos ni evitados, hay otros que sí son susceptibles de ser detectados como posibles vulnerabilidades remediables. Tempranamente estas pueden ser controladas, mitigadas y hasta eliminadas.

El caso particular del apagón del 16 de junio de 2019, objeto de estudio de este trabajo, puede definirse como un evento excepcional, en el cual todos los sistemas de seguridad que debían proteger el funcionamiento del SADI funcionaron incorrectamente. Este evento fue producto de un fallo en cascada que condujo al colapso total del sistema argentino de interconexión. Lo verdaderamente notable es que cada una de las fallas que se produjeron fue consecuencia de errores operativos, que pudieron haber sido evitados si se hubieran seguido todos los protocolos legalmente establecidos o si se hubieran detectado de manera temprana como posibles causas de fallos.

Haciendo un análisis de los apagones de mayor magnitud en Argentina en cuanto a cantidad de afectados, se puede concluir que, si bien los eventos iniciantes de estos pueden no haber sido netamente operativos, una vez comenzados los fallos en cascada los factores que terminaron acentuando la magnitud de estos eventos fueron justamente estos últimos.

Una manera de evitar que sucedan este tipo de fallos operativos es por medio de controles estrictos y rigurosos. Particularmente en el caso del apagón del 16 de junio de 2019, si bien la responsabilidad recayó en empresas transportistas y distribuidoras, es importante reconocer que CAMMESA, siendo el organismo responsable de coordinación y supervisión del funcionamiento del SADI, debería desarrollar nuevos sistemas de control de todas las empresas que forman parte de la generación, transporte y distribución de energía eléctrica. De esta manera, se podría evitar que un evento de estas características vuelva a tener lugar.

Consideraciones finales

Se realiza un llamado a la consideración del SADI como infraestructura crítica para poder promover mejores políticas públicas en relación con este sistema en función de su relevancia social. Esto implica destacar que un sistema interconectado de esta envergadura debe ser atendido en sus partes materiales (plantas, líneas de transmisión y todo tipo de equipamiento) e intangibles (tales como la información y los flujos virtuales), así como en cuanto al personal que interviene de diversas maneras en las etapas de la producción y uso de electricidad. En este sentido, es importante la realización de análisis de riesgo de cada zona geográfica y de cada etapa así como del conjunto del sistema, con el fin de determinar riesgos a los cuales puede estar sometido el SADI a partir de sus vulnerabilidades.

El reconocimiento del SADI como infraestructura crítica implica también la realización de evaluaciones periódicas del SADI en las cuales se ponga de manifiesto las falencias del mismo, con el fin de poder tomar las medidas necesarias para disminuir al máximo la probabilidad de los fallos. Y, si los fallos no pueden evitarse, entonces se deberá trabajar en los sistemas que permitan disminuir la magnitud de los mismos y de sus consecuencias en la población.

De acuerdo con el desarrollo descriptivo analítico llevado a cabo en este artículo, se desprende una serie de líneas futuras de investigación. En primer lugar, es recomendable profundizar en el análisis y clasificación de fallas y cómo estas son atendidas por los diversos actores que forman parte del SADI. En relación con ello, se debe entender mejor si las fallas que acontecen en el SADI son aisladas y aleatorias, su frecuencia y en qué medida son producto de la falta de procedimientos o control de las operaciones.

Por último, los autores de este texto destacan la relevancia de indagar acerca de las consecuencias que tuvo el apagón en tanto fenómeno excepcional, aunque no por ello menos nocivo. En este sentido, sería importante prestar atención a los efectos sobre el propio SADI, sea en su faz material como inmaterial, así como en las repercusiones en diversos ámbitos académicos e institucionales, tanto públicos como privados.

Vulnerabilities and Interruptions analysis in the Argentine interconnection system

ABSTRACT

The present paper deals with the factors that unleash blackouts, putting emphasis on those happened within the Argentine Interconnection System (SADI, in its Spanish acronym). The selected research problem is: Which vulnerabilities explain the factors that gave origin to the electric supply failures in Argentina, particularly regarding the episode of June 16th, 2019? The main purpose of the paper is to explain the factors that have provoked such phenomena. Methodologically, it is adopted an analytical descriptive case study. After approaching the SADI stages, the most important blackouts that have taken place in this country are addressed, fundamentally the episode occurred on June 16th, 2019. It is stated that this exceptional event happened due to the failing of safety systems and, furthermore, operative factors were those that stressed the magnitude of blackouts. Finally, it is made a call to consider SADI as a critical infrastructure and some further research areas are proposed.

KEYWORDS: Argentine Interconnection System. Blackout. Vulnerabilities. Failures.

NOTAS

ⁱ Noreste argentino: región geográfica argentina que comprende las provincias de Misiones, Corrientes, Chaco, Entre Ríos y Formosa.

ⁱⁱ Noroeste argentino: región geográfica argentina que comprende las provincias de Jujuy, Salta Tucumán, Catamarca, La Rioja y Santiago del Estero.

ⁱⁱⁱ Comahue: región geográfica argentina que comprende las provincias de Neuquén, La Pampa y Río Negro.

^{iv} Gran Mendoza: región geográfica argentina dentro de la provincia de Mendoza que comprende la capital y los departamentos de Guaymallén, Las Heras y Godoy Cruz.

^v EDESUR: Empresa Distribuidora de Energía Sur Sociedad Anónima, es una empresa privada, creada por el estado argentino, que tiene a su cargo parte de la red eléctrica del sur de la ciudad de Buenos Aires y partidos de la provincia de Bs. As. Al sur y sudoeste. La empresa forma parte del holding italiano Enel (EDESUR, 2020).

^{vi} Transener S.A.: es una empresa concesionaria de servicio público de transporte de energía eléctrica de alta tensión de Argentina. La misma opera el 85% de la red de alta tensión y supervisa el 15% del territorio argentino restante (TRANSENER, 2019).

^{vii} Yacyretá: entidad binacional hidroeléctrica entre Argentina y Paraguay, que se encuentra sobre el curso del río Paraná. Posee una capacidad instalada de 3100 MW, de los cuales 2745 MW están a disposición de Argentina (ENTIDAD BINACIONAL YACYRETÁ, 2020).

^{viii} Salto Grande: la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande es un Organismo Binacional entre Argentina y la República Oriental del Uruguay con el fin de aprovechar los rápidos del río Uruguay. Salto Grande. Está ubicada entre Concordia (Argentina) y Salto (Uruguay). Salto Grande es una central hidroeléctrica con una capacidad instalada de 1890 MW (SALTO GRANDE, 2020).

^{ix} Las islas en los sistemas eléctricos consisten en la desconexión de una zona o región del resto del sistema eléctrico. Su finalidad es asegurar que la mayor cantidad posible de generadores se mantengan en servicio luego de perturbaciones importantes del sistema, evitando que se provoquen apagones generalizados (CAMMESA, 1999).

REFERENCIAS

ARROYO, L. Así Ocurrió Minuto a minuto- Sandy deja una estela de destrucción en E.E.U.U. BBC, 30/10/2012. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2012/10/121029_livetext_supertormenta_sandy_ao. Acceso: 2/02/21.

BO, Z., SHAOJIE, O., JIANHUA, Z., HUI, S. GENG, W., MING, Z. An analysis of previous blackouts in the world: Lessons for China's. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 42, p. 1151-1163. 2015.

- BERNSTEIN, A., BIENSTOCK, D., HAY, D., UZUNOGLU, M., & ZUSSMAN, G. Sensitivity analysis of the power grid vulnerability to large-scale cascading failures. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, v. 40 n. 3, p. 33-37. 2012.
- BNAMERICAS. Brasil y Argentina negocian acuerdo de intercambio energético. *Bnamericas*, 24/05/16. Disponible en: <https://www.bnamericas.com/es/noticias/brasil-y-argentina-negocian-acuerdo-de-intercambio-energetico>, Acceso: 2/02/21
- CAMMESAa. Informe Mensual-Principales Variables del Mes. 2020. Disponible en: <https://portalweb.cammesa.com/MEMNet1/Informe%20Mensual/Informe%20Mensual.pdf>. Acceso: 2/02/21
- CAMMESAb. <https://portalweb.cammesa.com/default.aspx>. Acceso: 2/02/21
- CAMMESA. Procedimiento técnico n° pt-16 trabajos a realizar por los agentes del MEM para el proyecto de islas y arranque en negro – FASE I. 1999. Disponible en: [https://www.enre.gov.ar/web/bibliotd.nsf/203df3042bad9c40032578f6004ed613/31dd405c22f5c44a03256da5004fe2ed/\\$FILE/P_16_.pdf](https://www.enre.gov.ar/web/bibliotd.nsf/203df3042bad9c40032578f6004ed613/31dd405c22f5c44a03256da5004fe2ed/$FILE/P_16_.pdf). Acceso: 2/02/21
- CARBAJAL, M. El apagón más grave de la historia. *Página 12*, 25/11/02. Disponible en: <https://www.pagina12.com.ar/diario/elpais/1-13349-2002-11-25.html>
- CLARÍN. Energías Renovables Como funciona el Sistema Argentino de Interconexión. 13/12/18. Disponible en: https://www.clarin.com/brandstudio/funciona-sistema-argentino-interconexion_0_VbMUXj-vH.html
- CRESWELL, J. *Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing among Five Approaches*. Thousand Oaks, London and New Delhi: Sage Publications. 2007.
- DELL'ORO, G. Colapso en el Sistema Eléctrico. *Clarín*. 16/06/2019. Disponible en: https://www.clarin.com/sociedad/apagon-inedito-30-anos-mayor-corte-historia_0_8YxS6OzpG.html.
- DEY, P., Mehra, R., Kazi, F., Wagh, S. y Singh, N. Impact of Topology on the Propagation of Cascading Failure in Power Grid. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, v. 7, n° 4, p. 1970-1978. 2016.
- EDESUR. www.edesur.com.ar. Último acceso: 2/02/21.
- EL PAÍS. Un apagón deja sin energía eléctrica a la ciudad de Los Ángeles. *El país*, 12/09/15. Disponible en: https://elpais.com/internacional/2005/09/12/actualidad/1126476008_850215.html
- EL MUNDO. Un nuevo apagón en la India deja a 600.000.000 de personas sin electricidad. *El mundo*, 31/07/12. Disponible en: <https://n9.cl/w83I5>. Último acceso: 2/02/21.
- ENTIDAD BINACIONAL YACYRETÁ. www.eby.org.ar/la-central. Último acceso: 2/02/21.
- GOOGLE MAPS. Disponible en: [Maps.google.com](https://maps.google.com). Último acceso: 2/02/21.
- LA NACIÓN. Edesur inaugura la subestación Azopardo,» 4 Enero 1999.

LOPETEGUI, G. Acerca del evento eléctrico del 16 de Junio - Honorable Senado de la Nación. Buenos Aires, 2019.

MAZUR, A. Energy and Electricity in Industrial Nations: The Sociology and Technology of Energy. Abingdon: Routledge. 2013.

MERRIAM, S. Qualitative research. A guide to design and implementation. San Francisco: Jossey-Bass. 2011.

RUDNICK, H., DÍAZ, J. P. y ZAMORANO, J. Apagón en Bs. Aires. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile. 1999.

SALTO GRANDE. Accesible en: <https://www.saltogrande.org/caracteristicas.php>. Último acceso: 2/02/21

SMIL, V. Energy and Civilization: A History. Cambridge: MIT Press. 2018.

TRANSENER. Compañía de Transporte de Energía Eléctrica en Alta Tensión. Accesible en: <https://www.transener.com.ar/wp-content/uploads/2019/06/Transener-Company-Presentation-Web-1.pdf>. Último acceso: 2/02/21

YIN, R. Case Study Research Design and Methods. Thousand Oaks: Sage. 2017.

Recibido: 06/02/2021

Aprobado: 02/06/2022

DOI: 10.3895/rts.v18n54.13802

Como citar: CALCAGNO, D.L. et al. Análisis de vulnerabilidades e interrupciones del sistema argentino de interconexión. *Rev. Technol. Soc.*, Curitiba, v. 18, n. 54, p. 53-73, out./dez., 2022. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/13802>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

