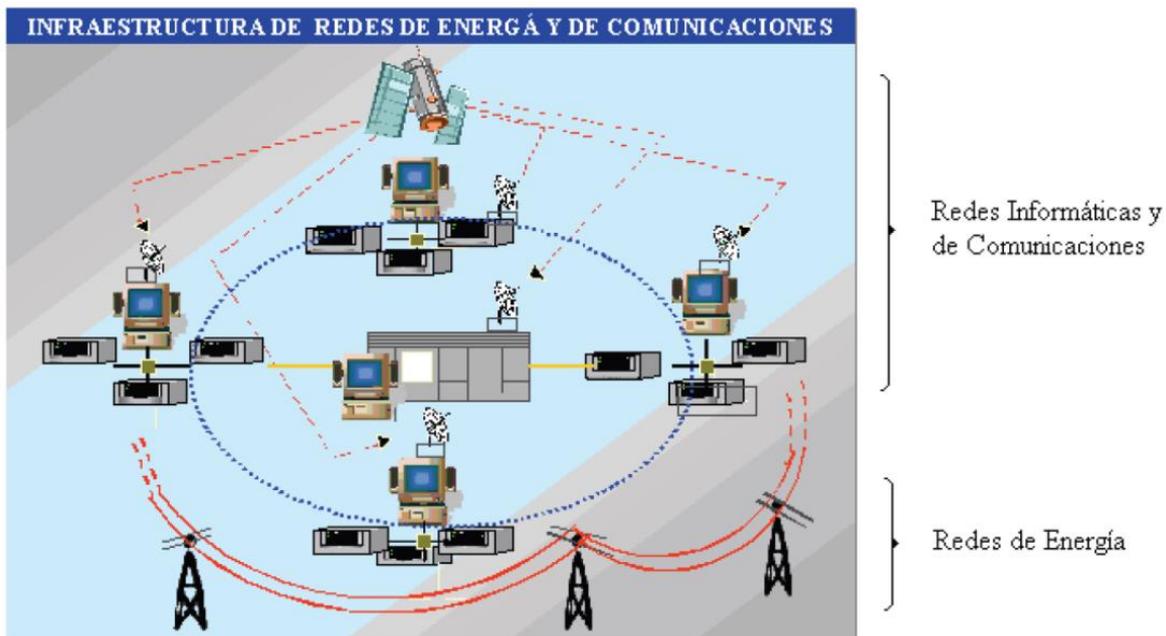


Apagón en Chile: ¿cuáles fueron las causas?

Dr. Jaime E. Luyo

Por la amplitud e impacto del corte de servicio de electricidad del país sureño de Latinoamérica que afectó prácticamente a toda la población desde Arica hasta la región de Los lagos, obligando al gobierno a decretar el toque de queda desde las 22 horas del martes 25 hasta las 6 horas del miércoles (Boric responsabilizó de la emergencia a las compañías privadas que manejan el sistema de electricidad. “¡Esto es indignante!, no es posible que la vida cotidiana de millones de chilenos y chilenas se vea alterada de esta forma por empresas que no hacen bien su trabajo”, enfatizó, al tiempo que anunció sanciones (AFP)); consideramos oportuno hacer referencia (guardando las diferencias en tamaño de sistema eléctrico, la fecha y causas) al apagón producido en los EE.UU. y que dio origen a medidas drásticas del gobierno para el desarrollo de nuevas tecnologías para el control de la seguridad de las redes complejas interactivas nacionales, entre las cuales están las redes de energía eléctrica, que se muestra en el gráfico siguiente.

Redes Complejas Interactivas: la red eléctrica es la plataforma crítica



NOTA: Figura tomada de : A.F. Chiri y J.E. Luyo, "La Seguridad Energética. Un Reto para el Perú en el Siglo XXI, Edit. CDLima, Colegio de Ingenieros del Perú, 2008.

Podemos observar que, todas las redes críticas dependen de la red eléctrica; es decir, si colapsa esta, arrastra a las otras: toda la modernidad depende de la electricidad. Reproducimos un extracto del libro arriba mencionado:

“...En 1998, coincidiendo con el gran apagón del oeste de EE.UU. en el mes de agosto y, en mayo con la falla del satélite Galaxy-IV afectando a 40 millones de usuarios de beepers y los vuelos aéreos fueron postergados y/o suspendidos y otros efectos secundarios³; y considerando que, prácticamente toda actividad económica y social crucial en la sociedad moderna depende de la operación segura y confiable de las infraestructuras interconectadas de energía, comunicaciones, transporte, finanzas y otras, y dada la creciente vulnerabilidad de éstas y la conciencia de que se requieren nuevas tecnologías y matemática, se dió inicio a uno de los más ambiciosos proyectos de investigación científico-tecnológico que se conocen para el control de la seguridad de las redes complejas interactivas nacionales. El

Departamento de Defensa de EE.UU. (DOD) y el Electric Power Research Institute (EPRI) en 1999 auspiciaron un proyecto de investigación cuyo objetivo fue la creación de revolucionarias capacidades de auto-estabilización, auto-optimización y de autoreparación para la red de energía eléctrica y las infraestructuras interconectadas de comunicaciones, transporte, y finanzas. El proyecto se denominó *The Complex Interactive Networks/Systems Initiative* (CIN/SI); para lo cual se conformó cinco consorcios de las mejores universidades de USA (V. Tabla 4.1, anexo 4.1) para el trabajo conjunto entre 1999 y 2002. En el resumen del reporte oficial de marzo del 2003, se informa de la creación de 19 nuevas tecnologías que incluyen: aislamientos adaptativos inteligentes de sistemas; un sistema de defensa de la infraestructura eléctrica; de protección y control ampliado; de pronóstico de demanda neuro-difusa y despacho anticipatorio de energía; control y monitoreo para sistemas en tiempo real empleando agentes¹ dependientes del estado de la red; nuevos fundamentos matemáticos para redes complejas interactivas (representadas como Sistemas Adaptativos Complejos, SAC². Se plantea continuar el desarrollo tecnológico....”

Irónicamente, después de que se presentó el reporte oficial del proyecto de I&Di; el 14 de agosto del 2003 se produjo en el noreste de los EE.UU. (incluyendo el sur de Canadá) el mayor apagón (por su amplitud y duración) que ha tenido este país; que se inició con la caída de una línea de transmisión en Columbus (Ohio), produciéndose una desconexión de decenas de línea de transmisión, y en cadena de unas 250 plantas de generación eléctrica, que dejó sin electricidad a más de 50 millones de personas en 8 estados y Ontario (donde se restableció la energía después de 30 horas) y, un impacto económico estimado en más de US \$ 10,000 millones.

El apagón total en Chile

Primeramente, como datos referenciales presentamos un resumen de la secuencia del apagón del 2003 en EE.UU. (USB2003) el 14 de agosto de un verano muy caluroso:

- Debido a la alta temperatura una serie de líneas de transmisión fuera del area del Midwest *Independent System Operator* (MISO) habían salido; sin embargo el *state estimator* (estimador de estado del sistema) no lo había detectado, información que tenía que alimentar al *Real-time Contingency Analysis* (RTCA, que permite adelantarse a situaciones críticas en la operación del sistema) y que estuvo fuera de línea incluso hasta 2 minutos antes del inicio del apagón;
- alrededor de las **1:30 pm**. en Cleveland, sale por sobrecarga un generador crítico para el área;
- cerca de las **2:15 pm**. el centro de control del área (norte de Ohio, Toledo, Akron, Cleveland) tiene fallas en sus computadoras, esta secuencia de fallas en conjunto deja en alta vulnerabilidad esta área de la red interconectada;
- aprox. a las **3:00 pm**. se produjo por la temperatura alta un cortocircuito en otra línea importante y el centro de control no lo detectaba y, a las **3:40 pm** salió otra línea sin detectar; según los especialistas: ya era muy tarde, para controlar la caída en cascada del sistema que

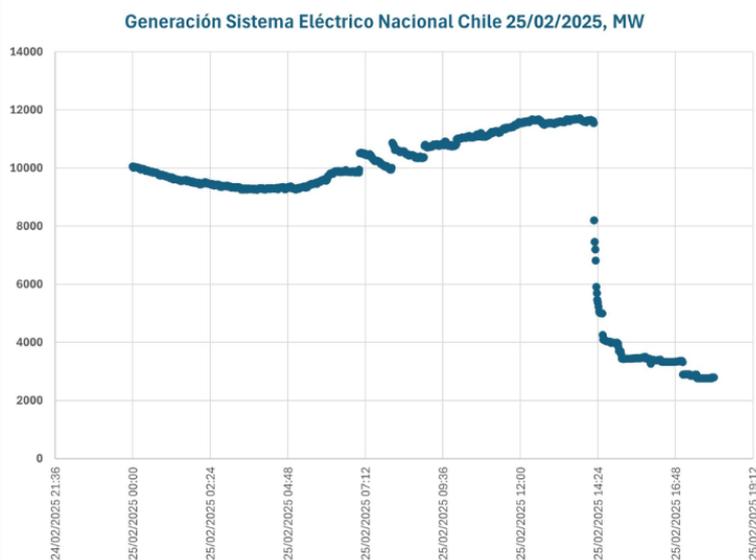
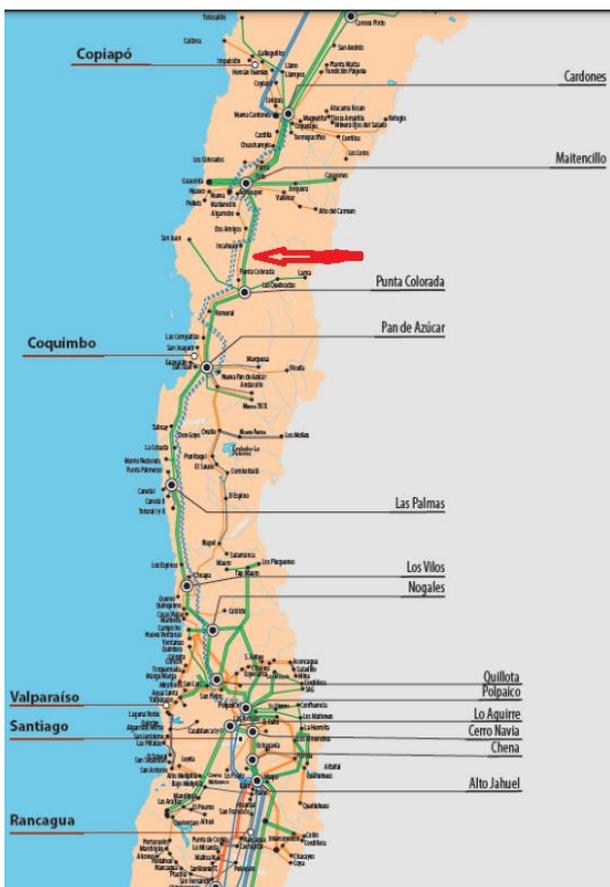
¹ Elementos complejos, autónomos, adaptativos al medio ambiente.

² Los SAC tienen como características más relevantes, entre otras : - Son muy extensos con muchos componentes dispersos y conectados, y que una acción o excitación en un componente producirá instantáneamente un cambio en todo el sistema; - Son difíciles de predecir, controlar, e incluso de explicar su comportamiento considerando solamente sus componentes; - Tienen una característica esencial la *adaptabilidad*. Es decir, cambian, evolucionan, aprenden con los cambios en su medio ambiente y en interacción con éste y con otros SAC. El estudio de los SAC ha sido posible a través de un enfoque multidisciplinario que comprende áreas tan diversas como la biología, física, ciencias de la computación, y la economía, principalmente. La implementación en software de la nueva arquitectura de *Control Distribuido* mediante agentes inteligentes adaptativos, emplea métodos comprendidos dentro de la disciplina denominada *Inteligencia Artificial Distribuida*.

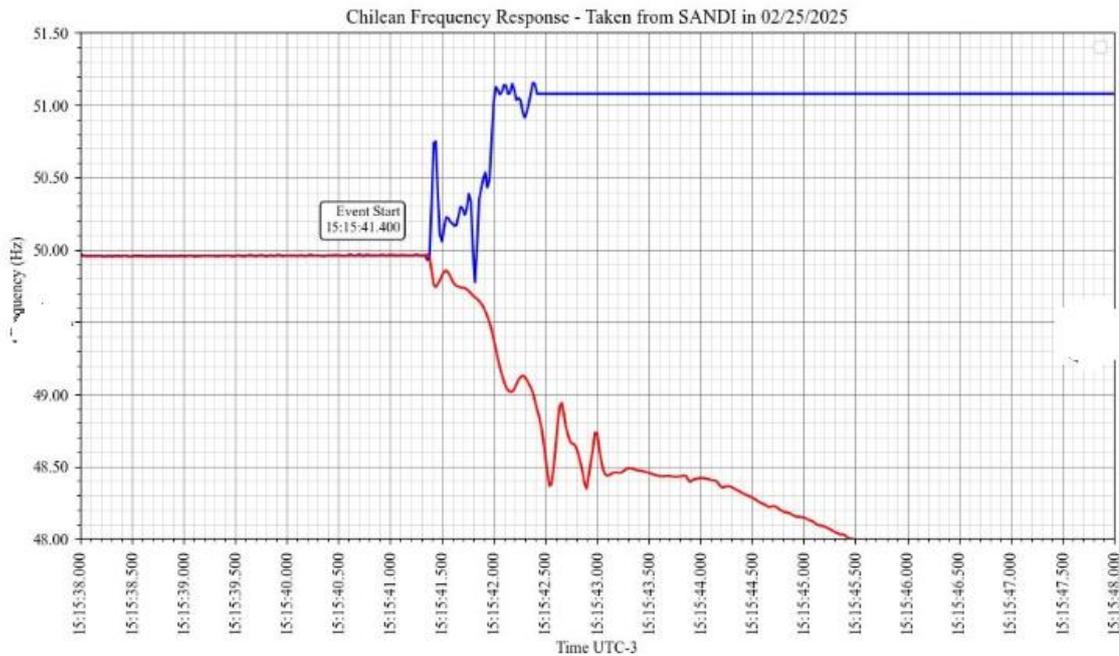
tomó unos **3 minutos** para que una enorme franja de líneas de transmisión, generadores y transformadores se desconectaran, produciéndose entonces en cascada el *blackout* total aproximadamente a las **4:10 pm**.

A la fecha, todavía no hay información técnica oficial sobre las causas de este evento de contingencia extrema por su gran impacto y de cobertura nacional, nos basaremos en datos publicados en los medios sobre la situación de la operación del SEN en el periodo de ocurrencia del *blackout*, para dar alguna explicación sobre el proceso y las posibles causas de este evento.

A continuación, se muestran unos gráficos del apagón en Chile (ACh2025) que se produjo el martes 25 de febrero, aproximadamente a las **15.16 hora** local, en instantes que había un flujo de 1.8 GW de la región norte hacia el sur en la línea de interconexión a 500 Kv cuyo tramo Nueva Maitencillo-Nueva Pan de Azúcar del Norte Chico³, se desconectó por una falla, a su vez este evento provocó la desconexión de ambos circuitos de las líneas de transmisión a 500Kv conectadas a las SSEE en Nueva Cardones y Polpaico produciéndose el *blackout* de todo el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), que incluso afectó a las provincias de Mendoza y San Juan en Argentina.



³<https://www.coordinador.cl/novedades/informacion-respecto-de-la-situacion-del-sistema-electrico-nacional/>



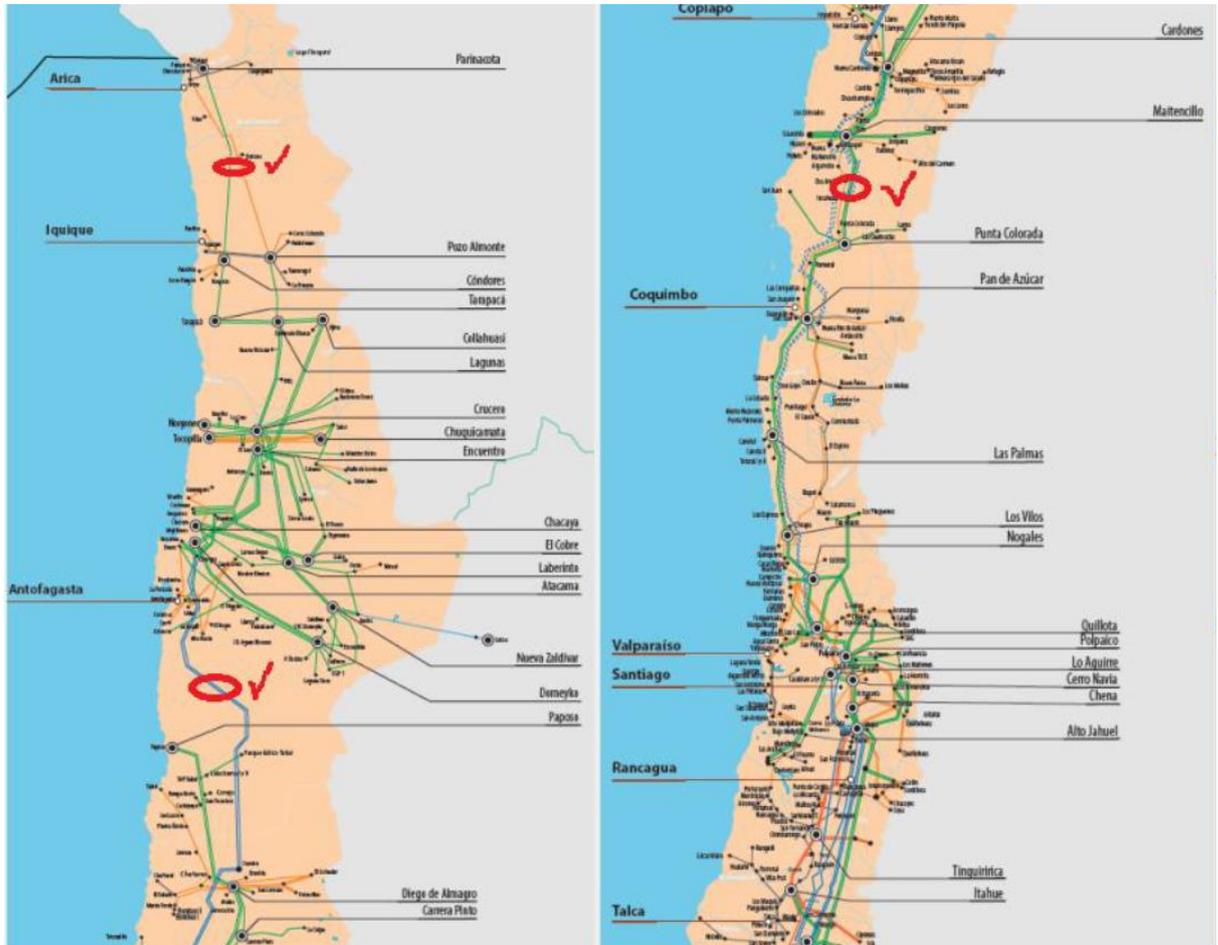
Observando estos gráficos, podemos decir que: el ACh2025 fue **casi instantáneo** (no fue en cascada y ni con aviso, como en el caso USB2003); el área Norte (antes Norte Grande) y la Centro-Sur se desacoplaron y, sobre todo que esta última colapsó rápidamente (y con una demanda mayor) y la Norte que fue más resiliente a pesar que tuvo una sobrefrecuencia eléctrica, y que, en nuestra opinión, no se perdió toda la carga en esta área debido al alto componente de generación solar y el almacenamiento de energía por batería.

También, es oportuno mencionar que en Perú, durante los debates técnicos en la Comisión de EyM del Congreso de la República, y con relación a la sesión del 15 de julio del año pasado; entre otros puntos, respondimos a la interrogante: **¿Qué lecciones podemos aprender de la experiencia de los países de la región?**, tomando como referencia la experiencia en Chile⁴, lo siguiente:

“En principio, todos los mercados de energía son diferentes por país; particularmente el mercado de electricidad que es un referente de la complejidad (tiene un soporte físico que cubre países enteros: “es la máquina más compleja y grande que existe”). Es un error comparar el Norte minero de Chile con el SEIN o con el sur del Perú, ya que, desde el punto de vista del sistema nacional de transmisión eléctrica; ya que el mismo expositor reconoce que existe problemas de congestión en la transmisión chileno (SEN). Pero, era conocido que, en el SIC (centro) la demanda eléctrica era tres veces de la demanda en el SING (norte) y, entonces al crecer la producción eléctrica con RERNC en el SING principalmente solar había un excedente a exportar hacia el SIC, pero, por deficiencia en el planeamiento eléctrico que debe considerar la expansión coordinada generación-transmisión; sobretodo porque el SEN tiene una transmisión eléctrica troncal prácticamente radial (por su geografía, más de 3,500 km. de longitud. Hace pocos años, se ha interconectado el SING minero con el SIC. Ver *checks* en color rojo de la fig.); mientras que en Perú el SEIN es una red mallada y se ha proyectado una mayor robustez hacia el largo plazo (con la generación más próxima a la carga), considerando también la interconexión con Ecuador para 2027 y más adelante con Chile y Bolivia. También, como en otros países, se han adoptado las nuevas tecnologías de almacenamiento y gestión de la energía. Las consecuencias en Chile son los problemas como la “curva del pato” (que no son permanentes), costos marginales nulos, y otros.”

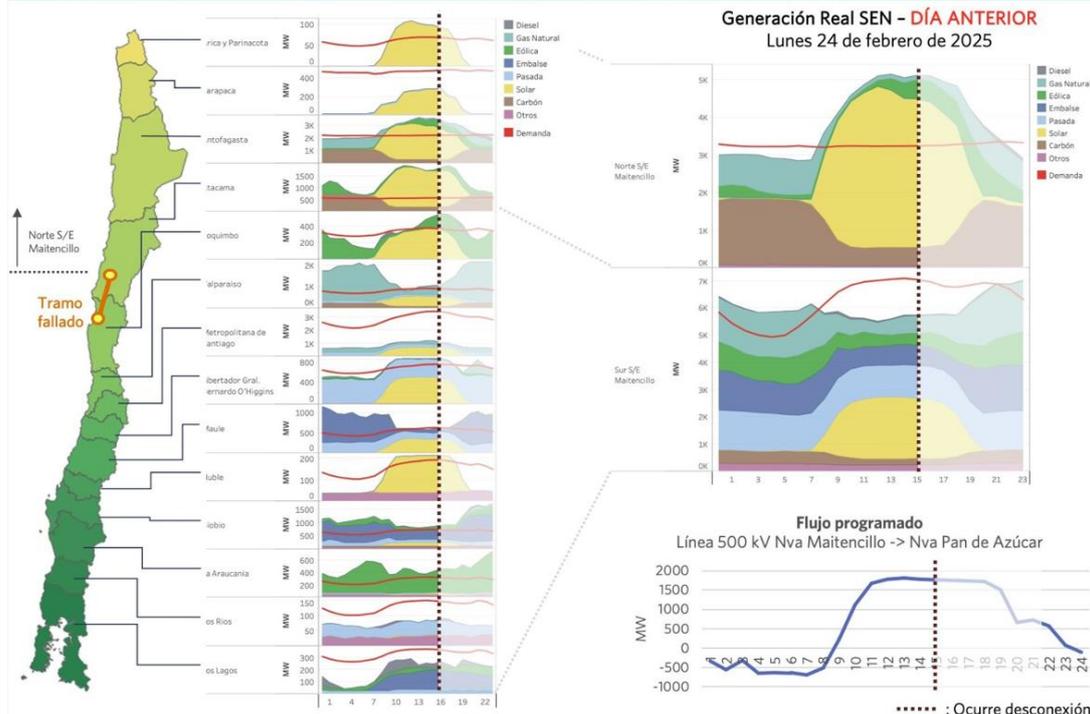
En esa aclaración sobre la diferencia entre los sistemas eléctricos de potencia interconectados de Perú y de Chile, señalamos (*checks* en rojo, gráfico siguiente) los tramos vulnerables de la línea de interconexión chilena y...justamente en el tramo señalado de Maitencillo-Pan de Azúcar de 500 KV se produjo la falla origen del mayor apagón en la historia del vecino país sureño.

⁴ J.E. Luyo, *RESPUESTA a las interrogantes y dudas en: Rumbo Energético. “Transición energética, la experiencia peruana y lecciones de la región”,* Competitiveness and Sustainable Development Institute, CSDI, 18 de julio 2024.



Sistema de Transmisión de Chile. Fuente: CIGRE, mayo 2021

Según la información contenida en el siguiente gráfico, la programación del día previo muestra que el día martes 25 de febrero durante cerca de 12 horas a partir de las 8 am. habrá un flujo de potencia eléctrica de la región norte hacia la región sur (con un max. de 1,800 MW) y que durante el día será mayormente de origen solar; justamente la falla en la línea de interconexión se produjo durante el periodo de máxima transferencia eléctrica que coincide con la máxima demanda en el SEN. Estas



Premisas que se cumplieron, incluyendo una demanda del sistema de unos 11,000 MW; pero surgen varias interrogantes: **¿cuáles serían las posibles causas del apagón total del SEN?; ¿por qué se produjo un apagón total y casi instantáneo en el área aislada Centro-Sur?**

Respecto a la primera; los responsables del SEN, como era de esperar, ya habían realizado recientemente un estudio de contingencias⁵ para evitar un apagón total, que concluía: “...De los resultados se destaca que el plan de defensa permite evitar el colapso del SEN para todas las contingencias analizadas, previniendo el colapso angular y de tensión de todo el sistema al separar oportunamente el SEN y asegura la operación estable de las 2 islas eléctricas formadas.”...” Por lo tanto, se puede concluir que se ha verificado que el rango de validez de la eficacia del PDCE Zona Norte (Plan de Defensa contra Contingencias Extremas) para los tramos de 500 kV entre la subestación Nueva Maitencillo y Polpaico, de 1600 MW en sentido NORTE-SUR y de 1000 MW en sentido SUR-NORTE, se mantienen.”. A continuación se muestra una tabla de resultados referentes a los tramos de línea de transmisión donde se localiza la falla que causó el apagón total. Se simuló el caso de Severidad 6 (falla que provoca apertura simultánea de ambos circuitos de una línea de doble circuito) en línea Nueva Maitencillo – Nueva Pan de Azúcar 2x500 (con 1600 MW en dirección Norte-Sur); en el evento estaba en el umbral 1800 MW.

⁵ ESTUDIO DE PLAN DE DEFENSA CONTRA CONTINGENCIAS, Coordinador Nacional. Junio 2024

Transferencias Pre-Contingencia [MW]			Condición Post Contingencia Isla Norte				Condición Post Contingencia Isla Centro-Sur			
Tramo	Sentido	Flujo [MW]	Frecuencia Max/Min [Hz]	EDAC [MW]	EDAG [MW]	Evolución	Frecuencia Max/Min [Hz]	EDAC [MW]	EDAG [MW]	Evolución
N.Cardones–N.Maitencillo	N->S	1200	51.59	-	530	Estable	48.91	-	-	Estable
	S-N	-1100	48.49	1018	-	Estable	51.61	124	1367	Estable
N.Maitencillo–N.PdAzúcar	N->S	1600	51.92	255	1830	Estable	48.62	1326	-	Estable
	S-N	-970	48.35	1003	-	Estable ⁽²⁾	51.61	-	982	Estable
N.PdAzúcar–Polpaico	N->S	1700	52.01 ⁽³⁾	201	1830	Estable	48.61	1477	-	Estable

EDAG : Esquema de Desconexión Automática de Generación EDAC : Esquema de Desconexión Automática de Carga

Considerando lo anterior, y que, además no se ha reportado algún cortocircuito en la línea u otra contingencia de importancia, podemos decir primeramente que, lo que habría sucedido y causado (o iniciado) el apagón total es que, por velocidad de actuación, actuaron los relés en las subestaciones de Nueva Maitencillo y Nueva Pan de Azúcar por una falla de comunicación entre ambos extremos que produjo la actuación de un relé diferencial aperturando las líneas conectadas a las barras; esto se debería a una mala calibración o deficiente mantenimiento de los dispositivos de protección, medición y control; es decir habría sido una “falla humana”. Esto produjo la separación del SEN en dos áreas aisladas con una dinámica diferenciada.

Respecto al colapso del área Centro-Sur, aparte de lo antes dicho, vemos que prácticamente no hubo tiempo para que actuaran los controles de regulación primaria que deben actuar en los primeros segundos de la contingencia; resultaría evidente entonces que, no hubo suficiente reserva rotante en el área Centro-Sur y fallaron las protecciones por sub-frecuencia y de variación de frecuencia, así como que no actuaron los sistemas de control y protección para los rechazos de carga en el área y tampoco el Control Automático de Generación.

Algunas reflexiones finales

- Si de lecciones se trata, ya hemos comentado que el vecino país del sur, por su geografía tiene un sistema eléctrico interconectado extenso y radial de más de 3,000 km. de longitud, por lo que debido a sus propias características también tiene soluciones *ad hoc*. En ese sentido, la línea que interconectó en el 2017 de más de 600 km. de longitud así como sus ampliaciones debieron ser de alto voltaje en corriente continua (*HVDC*, en inglés) que a largo plazo están resultando menos caras que las líneas de transmisión de alto voltaje en corriente alterna (*HVAC*, en inglés), a partir de esas grandes distancias y, además que no presentan problemas de estabilidad y de sincronización, de efectos inductivos o de potencia reactiva, y serían más apropiadas para la conexión de fuentes de generación renovables (como la solar y eólica que están alejadas), entre otros;
- esto es así, tomando en cuenta el cambio y progreso tecnológico. Recordando la famosa “guerra AC/DC” entre Tesla y Edison respecto a la transmisión eléctrica a grandes distancias, que terminó ganando Tesla que estaba a favor de la corriente alterna, que sucedió a fines del siglo XIX; pero, a inicios del siglo XXI debido al desarrollo de la electrónica de potencia y la ciencia de los materiales y la gran expansión de las redes eléctricas nacionales en países de gran extensión territorial está cambiando el punto de vista.

- Consideramos que, un país debe usar o consumir sus recursos energéticos renovables abundantes y menos contaminantes, como lo observamos en el caso de Chile y que se refleja en la dirección del flujo eléctrico de la región norte (con alta generación de origen solar) hacia el centro-sur, que se va a mantener en la mayor parte del día durante muchos años más.
- Las pérdidas económicas por el apagón total, estimamos que podrían llegar cerca a los US\$ 1,000 millones;

Finalmente, creemos que, en vista de esta experiencia estamos seguros que los responsables del SEN adoptarán las adecuadas medidas para mejorar la seguridad del sistema eléctrico, la planificación de mediano y largo plazo de la expansión (mayor confiabilidad con la redundancia, particularmente en la transmisión eléctrica; continuar con el mayor almacenamiento por baterías e incorporación de equipos *SVC*, *SVS*, *FACTS*) como en lo correspondiente a la operación (mejorando la coordinación de los sistemas de automatización, control y supervisión, de los servicios complementarios, entre otros).

Lima, 28 de febrero 2025

Dr. Jaime E. Luyo