

LA FÍSICA DE LAS CAÍDAS DEL SEN

THE PHYSICS OF SEN'S POWER OUTAGES

E. ALTSHULER^a, L. VAILLANT-ROCA^b

a) Centro de Sistemas Complejos, Facultad de Física, Universidad de La Habana, 10400 La Habana, Cuba. ealtshuler@yahoo.com

b) Laboratorio de Fotovoltaica del Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE) – Facultad de Física, Universidad de La Habana, Cuba.

En los años 1980's la TV cubana pasaba una cantidad muy limitada de películas de entretenimiento "occidentales". La noche de los sábados era uno de esos raros momentos en que pasaban dos películas "buenas", seguidas por una enorme cantidad de tele-espectadores. Un conocido de uno de los autores (E.A.) que trabajaba en la Despacho Nacional de Carga, relata que los responsables del turno del sábado en la noche debían mirar atentamente esas películas en un monitor de TV dedicado a ello. Apenas terminaba la segunda película, pasaban frenéticamente a ajustar la generación eléctrica despachable del país, para se adaptara a la dramática caída de consumo eléctrico asociada a apagar cientos de miles de televisores al unísono. Este ejemplo ilustra bien uno de los principios básicos para garantizar la estabilidad de una red eléctrica: la necesidad del equilibrio instantáneo entre generación y consumo.

El Sistema Electroenergético Nacional (SEN) fue diseñado para funcionar con grandes turbinas girando (termoeléctricas de petróleo o diésel). Esas turbinas tienen inercia: ejes de enorme masa girando a 60 Hz. Si de repente falla una planta, la inercia sostiene la frecuencia por unos segundos –que pueden resultar críticos para la que no se pierda la estabilidad de la red eléctrica del país.

Un panel solar fotovoltaico representa el otro extremo, pues posee cero-inercia: cuando, por ejemplo, una nube proyecta una sombra, su producción cae a cero en fracciones de segundo. Y ahí se tiene otro tipo de problema: si en ese momento hay muchos paneles en la red y pocas turbinas girando en las termoeléctricas, la frecuencia se desploma. Y, si la frecuencia baja demasiado, el sistema se desconecta sólo, para protegerse. Ocurre entonces la temida "caída del SEN". Este escenario puede involucrar no sólo a los paneles solares, sino a otras fuentes renovables de energía. Un método para agregar "inercia" a estas fuentes es el uso de bancos de baterías que acumulen parte de la energía generada, y la pueden distribuir en el momento que sea necesario para ajustar el delicado balance entre generación y consumo. Lamentablemente, las baterías son relativamente caras.

En pocas palabras: en ausencia de baterías u otros sistemas de almacenamiento de la energía producida, la contribución a la generación eléctrica fotovoltaica no debe ser superior a cierta fracción de la generación total. Así, si salen súbitamente del sistema demasiadas termoeléctricas en un país y la contribución de la generación de energías renovables crece excesivamente, el sistema es mucho más susceptible a sufrir una inestabilidad.

La causa de ésta también puede comenzar por un accidente en la red misma de transmisión de energía.

Esto no es un problema exclusivamente cubano. Por ejemplo, en septiembre de 2016, Australia del Sur vivió un apagón relativamente similar. A las 4:16 de la tarde, una tormenta derribó varias torres de transmisión. En solo dos minutos, la red sufrió seis caídas de tensión consecutivas. Los parques eólicos (que, como los paneles solares, usan inversores electrónicos y no tienen inercia) estaban programados con una protección: si ocurrían demasiadas perturbaciones en poco tiempo, se desconectaban automáticamente. Eso fue exactamente lo que pasó. En menos de siete segundos, 456 megawatts de generación eólica desaparecieron de la red. La interconexión con el sistema vecino se sobrecargó y también se desconectó. Australia del Sur quedó en modo *isla*: sólo con su propia generación, que era insuficiente para la demanda. A las 4:18 de la tarde, más de 850 mil clientes quedaron sin electricidad. [1]. Cuba basa el grueso de su producción eléctrica en termoeléctricas muy viejas (varias de los años 80 del pasado siglo), que sufren una escasez crónica de combustible. Por ejemplo, la termoeléctrica "Antonio Guiteras", con sus cerca de 300 megawatts de potencia nominal [2] y su achacosa caldera –que obviamente requería de una inversión capital desde hace años– es la mayor de la isla.

Impulsada por nuestra crisis energética crónica, y para disminuir la dependencia de combustibles fósiles importados, la isla ha aumentado la participación de la energía solar en su matriz eléctrica del 5.8% a más del 20% en solo un año [3]. Para marzo de 2026, ya operaban 49 parques solares con una capacidad de hasta 1000 MW. Se trata de una expansión masiva con inversión cubana que, según plan, debe llegar a los 2000 MW en un par de años. A ello se suman algunas donaciones provenientes fundamentalmente de China y Vietnam. A pesar de estos avances, el suministro sigue siendo frágil: el déficit de generación térmica provoca apagones muchas horas diarias. Se ha confirmado que el potencial técnico para el desarrollo futuro es enorme, estimando que los techos cubanos podrían generar 2,175 GWh anuales [4]. Adicionalmente, en el país está en proceso de puesta en marcha un primer banco de baterías de 50 MW, que ha de estar instalado cuando éstas líneas salgan a la luz, mejorando en alguna medida la disponibilidad de energía eléctrica a lo largo del día y la estabilidad de la red como un todo. Vale subrayar que esta transición de la matriz energética está siendo asesorada muy de cerca por

el Laboratorio de Fotovoltaica del Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE) de la Universidad de La Habana, que fue reconocido por la Alianza Solar Internacional como el primer y único Centro STAR en América Latina una distinción que avala su capacidad para promover estándares internacionales en tecnología solar [5]. Como hemos sugerido más arriba, un problema muy serio asociado a esta acelerada y necesaria transformación de la matriz energética es no-trivial: asimilar tanta generación sin inercia. Y no sólo por la existencia de termoeléctricas muy viejas con paradas frecuentes, sino por la carencia crónica de combustible que no permite que los grupos electrógenos sean manipulados para “adaptarse dinámicamente” a las fluctuaciones. El resultado lo hemos vivido repetidamente: apagones por inestabilidad dinámica. Aunque obviamente la buena organización (o falta de ella), sentido de la previsión (o falta de él), los factores externos (como el cerco petrolero impuesto desde inicio de este año) y la acelerada presencia de fuentes energéticas renovables son elementos fundamentales que deciden las “caídas del SEN”, la Física y las ciencias de la computación poseen sin duda un nicho científico para contribuir a su estabilidad, más allá de diseño mismo de los paneles y la electrónica asociada. Un artículo de revisión de Witthaut y colaboradores [6] ilustra el enorme campo que se abre ante la física estadística en términos de la modelación de los fenómenos colectivos y no-lineales asociados a las redes eléctricas sometidas a fluctuaciones, que podrían permitir el rediseño y/o control de dichas redes sobre la base de datos reales.

La Física cubana ya ha salido en ayuda del SEN. Comenzando por los dispositivos en sí mismos, podemos decir que el conocimiento acumulado en el Laboratorio de Fotovoltaica de la Universidad de la Habana sobre las tecnologías de fabricación de celdas solares (en especial de silicio) [7], ha permitido asesorar sobre los módulos fotovoltaicos que podrían adaptarse mejor a las condiciones cubanas de alta radiación, alta temperatura ambiental y altos valores de humedad relativa.

Por su parte, los colegas del Instituto de Meteorología (Insmet) han desarrollado un modelo de pronóstico de generación solar a partir de variables climáticas que se utiliza desde hace años para la gestión de la estabilidad del SEN [8], el cual está siendo perfeccionado con la ayuda de herramientas de Inteligencia Artificial. Dentro de este tema, se ha estudiado en otros lares la influencia de la forma de las nubes en la forma de sus sombras, con evidente impacto en la generación solar [9]. Curiosamente, para ello se ha utilizado la dimensión fractal de las nubes para cuantificar su forma, un tema en el que colegas de la Facultad

de Física de la Universidad de La Habana, el Instec y el Insmet han colaborado en el pasado [10].

Otra contribución de la Física y la matemática aplicada a la estabilidad del SEN podría ser el estudio de las series temporales de la frecuencia de la red medida en una serie de puntos, y crear un algoritmo para predecir posibles desviaciones “caóticas” de la frecuencia deseada, en tiempo real. Semejante medición no parece especialmente difícil, si se usan sensores distribuidos.

Desde luego, esto nos recuerda a una serpiente que se muerde la cola: para que exista la estabilidad de cómputo (¡y humana!) necesaria para que nuestros físicos “se metan” en estos asuntos, no sólo hace falta la colaboración de las instituciones: hace falta que haya estabilidad en el fluido eléctrico.

REFERENCIAS

- [1] Australian Energy Market Operator (AEMO), “Black System South Australia 28 September 2016 - Final Report”, 2017.
- [2] “Power Plant Profile: Antonio Guiteras Plant, Cuba”, Power Technology, <https://www.power-technology.com/data-insights/power-plant-profile-antonio-guiteras-plant-cuba/>.
- [3] M. S. Calvo y H. S. Lee, *Energy Reports* **14**, 254 (2025).
- [4] “As the US starves it of oil, Cuba is pulling off one of the fastest solar revolutions on the planet with China’s help”, CP24, <https://www.cp24.com/news/world/2026/05/13/as-the-us-starves-it-of-oil-cuba-is-pulling-off-one-of-the-fastest-solar-revolutions-on-the-planet-with-chinas-help/> (2026).
- [5] “Fotovoltaica UH Star”, Universidad de La Habana, <https://www.uh.cu/2025/08/08/fotovoltaica-uh-star/> (2025).
- [6] D. Witthaut, F. Hellmann, J. Kurths, S. Kettemann, H. Meyer-Ortmanns y M. Timme, *Rev. Mod. Phys.* **94**, 015005 (2022).
- [7] L. Vaillant-Roca, *Rev. Cubana Fis.* **40**, 2 (2023).
- [8] I. Borrajeró-Montejo, A. Roque-Rodríguez, J. C. Peláez-Chávez, M. Hinojosa, K. Naranjo-Villalón y M. Sierra-Lorenzo, *Ingeniería Energética* **44**, 66 (2023).
- [9] G. M. Lohmann, A. Hammer, A. H. Monahan, T. Schmidt y D. Heinemann, *Solar Energy* **150**, 255 (2017).
- [10] A. R. Batista-Tomás, O. Díaz, A. J. Batista-Leyva y E. Altshuler, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **142**, 938 (2016).