

FORTALECIENDO AL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL CON SOL Y AIRE: EL PAPEL DE LA ELECTROQUÍMICA

STRENGTHENING THE NATIONAL ELECTRIC SYSTEM WITH SUN AND AIR: THE ROLE OF ELECTROCHEMISTRY

Ricardo M Hernández-R¹, Yris J Martínez¹, Arturo J Hernández-R²

¹Laboratorio de Electroquímica, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes Mérida 5101, Venezuela

²Grupo de Estudios en Energías Renovables (Zuhé-GEER), Mérida 5101 - Venezuela
Email: rmhrula@gmail.com

Recibido: 01-10-2021

Aceptado: 14-10-2021

Resumen

Se presenta la dimensión y evolución del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) Venezolano desde 1990, sus debilidades en términos de su extensión y de la distancia que separa al principal centro generador de los pueblos y ciudades del país. El 60% de la energía del SEN es producida fundamentalmente por un gran sistema hidroeléctrico, con un muy pequeño aporte de energía renovable no convencional (solar y eólica); el 40% restante se produce a partir de sistemas termoeléctricos. Los convenios suscritos por el país y las tendencias mundiales en generación de energía, producto de los acuerdos por el cambio climático, obligan a la sustitución de las instalaciones termoeléctricas por sistemas de energías renovables. La extensión del SEN lo hace susceptible de sufrir eventos que pueden causar una interrupción mayor del servicio. Se plantea así la necesidad de diversificar los sistemas de generación, mediante la incorporación de micro-redes (mRi) interconectadas que permitan reducir las exigencias de carga al SEN, creando zonas protegidas. Las mRi requieren sistemas de acumulación para llenar la intermitencia de los sistemas eólicos y solares. Esta estrategia requiere la formación de profesionales capaces de efectuar el diseño y construcción de las instalaciones energéticas, y establecer los programas de mantenimiento necesarios. Es necesaria además la formación y estímulo a investigadores en esta área del conocimiento, para que realicen los estudios y desarrollos requeridos para lograr la independencia tecnológica. Se destaca la muy poca actividad de investigación en el área de la energía electroquímica y la necesidad de incentivar estudios en la amplia variedad de sistemas de acumulación electroquímica existentes; esto permitirá la apropiación y generación de conocimientos necesarios para desarrollar un parque tecnológico-industrial para el reciclaje y reutilización de los sistemas de acumulación agotados y el desarrollo de nuevos sistemas de acumulación, de acuerdo a las necesidades del país.

Palabras clave: Sistema Eléctrico, venezolano, Energía renovable, fotovoltaico, solar, Eólico, Electroquímica, Baterías.

Ricardo María Hernández Romero: (Ph.D, MSc.) Departamento de Química, Grupo de Electroquímica. Profesor Titular, Av. Alberto Carnevali, La Hechicera, Núcleo Universitario “Pedro Rincón Gutierrez”, Facultad de Ciencias. Mérida, Mérida, Venezuela. **Yris Josefina Martínez:** (Dra), Departamento de Química, Grupo de Electroquímica. Profesor Titular, Av. Alberto Carnevali, La Hechicera, Núcleo Universitario “Pedro Rincón Gutierrez”, Facultad de Ciencias. Mérida, Mérida, Venezuela. **Arturo de Jesús Hernández Romero:** (Ing.), Grupo de Estudios en Energías Renovables (Zuhé-GEER), Investigador independiente. Urb. Sta María, Mérida, Mérida. Venezuela

Abstract

The dimension and evolution of the Venezuelan National Electric System (SEN) since 1990, its weaknesses in terms of its extension and the distance that separates the main generating center from the towns and cities of the country are presented. 60% of the SEN's energy is produced fundamentally by a large hydroelectric system, with a very small contribution from non-conventional renewable energy (solar and wind); the remaining 40% is produced from thermoelectric systems. The agreements signed by the country and global trends in energy generation, as a result of climate change agreements, require the replacement of thermoelectric installations by renewable energy systems. The extension of the SEN makes it susceptible to events that can cause a major disruption of the service. This raises the need to diversify generation systems, through the incorporation of interconnected microgrids (mRi) that allow reducing the load requirements to the SEN, creating protected areas. The mRi require accumulation systems to fill the intermittency of the wind and solar systems. This strategy requires the training of professionals capable of carrying out the design and construction of energy facilities, and establishing the necessary maintenance programs. It is also necessary to train and encourage researchers in this area of knowledge, so that they carry out the studies and developments required to achieve technological independence. The very little research activity in the area of electrochemical energy and the need to encourage studies in the wide variety of existing electrochemical storage systems are highlighted; This will allow the appropriation and generation of knowledge necessary to develop a technological-industrial park for the recycling and reuse of exhausted accumulation systems and the development of new accumulation systems, according to the needs of the country.

Keywords: Electrical System, Venezuelan, Renewable energy, photovoltaic, solar, Wind, Electrochemical, Batteries.

Introducción

Según la Agencia Internacional de Energía (por sus siglas en inglés: IEA)¹ para el año 1990 la energía eléctrica producida en Venezuela era de 59.321 GWh; de los cuales, 36.983 GWh (62,34%) eran hidroeléctricos y 22.338 GWh (37,66%) termoeléctricos (15.514 GWh a partir de gas natural y 6.824 GWh provenientes de gasoil).

Casidos décadas después, en 2009 la energía eléctrica en el país había aumentado hasta 113.767 GWh, de los cuales a la generación hidroeléctrica correspondió 76.780 GWh

(67,5%), a la termoeléctrica correspondió un 36.985 GWh (32,5%); a partir de este año comienzan años siguientes la generación de energía eléctrica en el país comienza a sufrir altibajos producto de una crisis causada por una suma de circunstancias; consecuencia de la inestabilidad política y como efecto de las medidas coercitivas del gobierno de los Estados Unidos de América, alcanzando un máximo de generación en 2013 cuando se generan 123.225 GWh; con un 67,8% de generación hidroeléctrica y un 32,1% de generación termoeléctrica (17,1% a base de gas y 15,03% a partir de combustibles de petróleo). Ver figura 1.

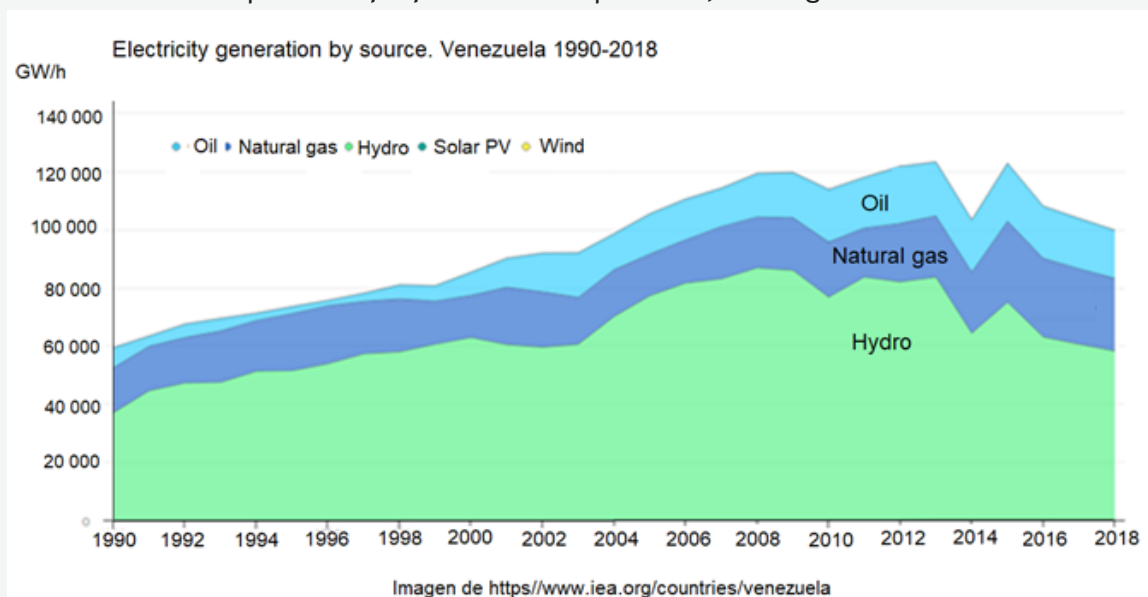


Figura 1.- Producción de energía eléctrica en Venezuela entre 1990 y 2018.

Para 2019, la cantidad de energía eléctrica producida en Venezuela disminuyó a 85.167 GWh de estos, el 58,3% fueron hidroeléctricos y el 41,6% termoeléctricos (21.298 GWh a partir de gas natural y 14.135 GWh provenientes de combustibles del petróleo) y 97 GWh de energía fueron obtenidos a partir de recursos renovables (9 GWh fotovoltaicos y 88 GWh eólicos).

Para 2020, según el Anuario estadístico 2021 de Enerdata, una empresa de consultoría e inteligencia energética, la producción de Energía Eléctrica en Venezuela cayó a 93.000 GWh; de los cuales 61% es renovable, proveniente toda de la generación hidroeléctrica, sin registro de producción eólica o solar.²

Como hemos visto, la energía eléctrica en Venezuela se produce fundamentalmente por generación hidroeléctrica (alrededor de un 60%) y por generación termoeléctrica (alrededor de un 40%). La suma de toda esa energía converge en un único sistema: el Sistema Interconectado Nacional (SIN) concebido para dar energía eléctrica a toda Venezuela. La Figura 2 muestra la extensión de las líneas de transmisión y las interconexiones del SIN.³

La energía generada por fuentes hidroeléctricas proviene fundamentalmente del sur de Venezuela, de la **Central Hidroeléctrica Simón Bolívar**, en la represa de Guri, en el estado Bolívar. Desde allí la energía eléctrica es transmitida hacia el resto

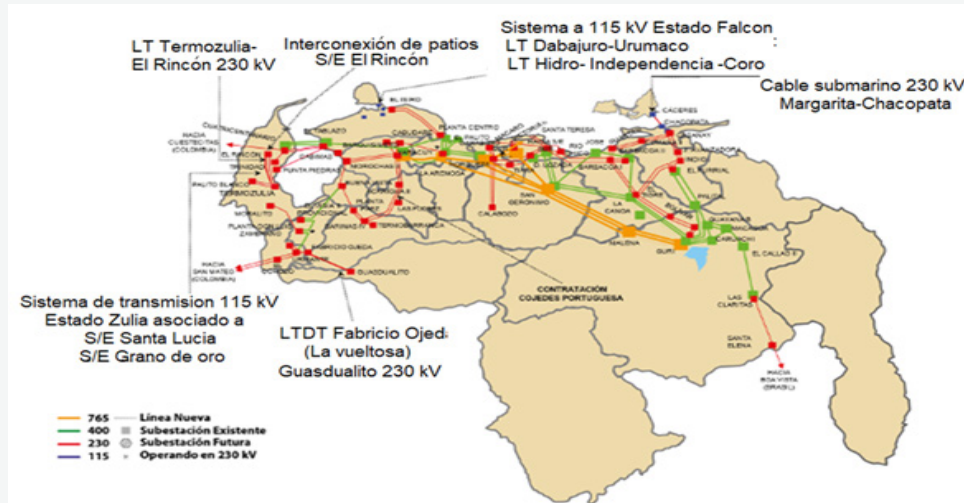


Figura 2 . Sistema Interconectado Nacional (SIN), líneas de transmisión e interconexión. <http://www.corpoelec.gov.ve/transmision>

del país a través de una de las pocas redes existentes en el mundo capaz de operar a un nivel de extra alta tensión (765 kilovoltios), que recorren unos 2.230 kilómetros. Estas líneas de 765 KV son el mayor contribuyente de energía eléctrica a la red de transmisión; **aportan el 85%** de la energía que se envía hacia el centro del país desde el Guri. La mayoría de las ciudades más grandes de Venezuela reciben energía de la subestación San Gerónimo B, conectada a la central hidroeléctrica Simón Bolívar, a través de una de las líneas de alta tensión eléctrica. Por otro lado, la generación termoeléctrica, proviene de unas 20 centrales distribuidas por toda la geografía nacional, incluyendo Planta Centro, la más grande de América Latina.

Como puede apreciarse, este Sistema Interconectado Nacional (SIN) o Sistema Eléctrico Nacional (SEN) es altamente vulnerable debido fundamentalmente a dos factores:

- 1) La mayor parte de la generación de electricidad ocurre en un solo complejo hidroeléctrico; en consecuencia, cualquier falla en dicho complejo genera un gran efecto en el SEN.
- 2) Dicho complejo hidroeléctrico se encuentra en una región muy distante de los centros que requieren de su energía; por lo cual, se emplean largas líneas de transmisión hasta sitios neurálgicos de interconexión; todo lo

cual deben ser monitorizados y mantenidos en un esquema las 24 horas del día durante los 365 días del año.

Indudablemente este es un sistema de costoso mantenimiento, cuyo costo en tiempos de bonanza y paz puede ser asumido, debido a las ventajas que ofrece su potencial; sin embargo, en situaciones adversas, sean de origen natural (fenómenos climáticos; como las sequías, El Niño o la Niña) o de origen antrópico (por intervención humana) representa una importante vulnerabilidad que requiere de ingentes esfuerzos de protección y mantenimiento. Ante tal riesgoso escenario, era necesario diseñar una reconfiguración paulatina del SEN incorporando sistemas alternos menos vulnerables y de menor costo en mantenimiento.

Lamentablemente, la inestabilidad política y la crisis económica del país, el bloqueo financiero y comercial, aunado al deterioro natural de los equipos, la acción vandálica de delincuentes, los eventos naturales adversos y la reducción de los recursos destinados al mantenimiento del sistema, han causado un deterioro acelerado y un importante incremento de la inestabilidad del SEN. Esta situación crítica requiere de una acción urgente para corregir fallas y estabilizarlo, para preservar la calidad de vida de la población y las capacidades de generación de bienes y servicios de los sectores industriales, públicos y privados.

En este contexto, es importante resaltar las tendencias globales en la generación de energía. El mundo está en medio de una revolución mundial de energías renovables con instalaciones de nuevos sistemas de energía solar y eólica aumentando rápidamente. Los costos de generación de energía renovable han caído drásticamente durante la última década; durante la cual, la generación de energía renovable se convirtió en la opción más económica.

La década de 2010 a 2020 representa un período notable de reducción de costos para las tecnologías de energía solar y eólica. Durante este período los costos de la electricidad de la energía solar fotovoltaica a escala de servicios públicos cayeron un 85% entre 2010 y 2020; en general, el costo de la electricidad proveniente de la energía solar y eólica se redujo a niveles muy bajos. Desde 2010, a nivel mundial, se ha agregado un total acumulado de 644 GW de capacidad de generación de energía renovable con costos estimados que han sido más bajos que la opción más barata de combustibles fósiles en cada año respectivo. En 2020, el promedio ponderado del Costo Nivelado de Electricidad (CNDE) global de las nuevas instalaciones de energía eólica terrestre disminuyó un 13 %, en comparación con 2019.

El CNDE (LCOE por sus siglas en inglés) de una tecnología dada es la relación entre los costos de por vida y la generación de electricidad de por vida; en otras palabras, es una valoración económica del coste total medio para construir y operar un activo generador de energía durante su vida útil dividida por la salida de energía total del activo durante ese tiempo de vida. Durante el mismo período, el CNDE de la energía eólica marina disminuyó un 9 % y el de la energía solar fotovoltaica (FV) para servicios públicos en un 7%.

Cada vez más, los nuevos proyectos solares y eólicos están ofreciéndose a menor precio que las centrales eléctricas de carbón existentes más baratas y menos sostenibles. El análisis de costos realizados por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés),

sugiere que los 800 GW de la capacidad de generación a base de carbón existente tienen costos operativos más altos que los nuevos sistemas de energía solar fotovoltaica y energía eólica terrestre a escala de servicios públicos, incluyendo los 0,005 USD/kWh de costos de integración. Reemplazar estas plantas de carbón reduciría los costos anuales del sistema en 32 mil millones de dólares estadounidenses por año y reduciría las emisiones anuales de CO₂ en alrededor de 3 gigatoneladas de CO₂.⁴

El efecto invernadero, el cambio climático y las necesidades de generación de energía limpia son asuntos que ocupan titulares estelares en la actualidad. Recientemente el grupo de países más desarrollados, que conforman el G20, propusieron como meta conseguir que la economía mundial retome el camino de desarrollo "sostenible y equilibrado". Para alcanzar esta meta es imprescindible avanzar en una transición energética desde las contaminantes energías fósiles hacia las energías renovables, más limpias; para lo cual los 20 líderes de las economías más importantes y de los países emergentes reafirmaron el objetivo del Acuerdo de París de 2015: "limitar el aumento de la temperatura del planeta por debajo de los 2 C° y continuar sus esfuerzos para limitarla a 1,5°C respecto de los niveles preindustriales".⁵

En el marco de la Convención sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas, 40 países, entre los que se cuentan EEUU, la Unión Europea, China y varios países considerados vulnerables al cambio climático, se han unido a la "Agenda de Logros de Glasgow", comprometiéndose a facilitar tecnología limpia y asequible, a nivel global, para 2030.⁶ La iniciativa se enmarca en la propuesta de la "estrategia cero neto" (Net Zero Strategy). La estrategia de "cero neto" se refiere al equilibrio entre la cantidad de gas de efecto invernadero producido y la cantidad eliminada de la atmósfera. Se alcanza el cero neto cuando la cantidad de gases de efecto invernadero que agregamos no es mayor que la cantidad que se quita. Para lograr esto se requiere reducir las emisiones tanto como sea posible, así como equilibrar las que quedan

eliminando una cantidad equivalente. En el marco de ésta estrategia el G20 acordó dejar de subvencionar, a partir de finales de 2021, nuevas centrales térmicas de carbón en el extranjero.⁷

Asimismo, se pretende facilitar que países y empresas se coordinen para reforzar su acción climática. Con ello, estos países intentan aumentar la velocidad de desarrollo y despliegue de energías limpias y al mismo tiempo, rebajar sus costos en esta década. Hasta el presente, de las 191 Partes del Acuerdo de París, más de 80 países han presentado un nuevo plan de acción nacional o han actualizado el actual, lo que se conoce como Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (National Determined Contributions-NDC), según se estipula en el acuerdo.

Las Políticas de Estado Venezolano para incorporar las fuentes de energías renovables

En este contexto Venezuela, como signataria de la Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático desde 1994, junto con otros 33 países de América Latina y el Caribe,⁸ se comprometió a promover y adelantar políticas que incentiven la mencionada transición energética. Así nuestro país, aunque posee 7 instrumentos políticos⁸ que promueven la protección del medio ambiente y el derecho de los ciudadanos a un ambiente seguro, sano y ecológicamente equilibrado (artículo 127 de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela), ha dado muy tímidos pasos en la implementación de instalaciones para ésta transición energética.

El Plan de la Patria 2013-2019 tenía como objetivo para el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) integrar los recursos renovables en el sistema eléctrico incluyéndolos en estrategias de mediano y largo plazo. Su objetivo era desarrollar el uso de energías renovables en comunidades rurales aisladas, incluidas la energía solar, las pequeñas centrales hidroeléctricas y de biogás.² Según Alejandro López-González,⁹ Venezuela pasó de un 96,77% de electrificación en el año 2001 a más del 99%

en el año 2013. Dentro de este incremento, entre 2005 y 2013, se instalaron alrededor de 3500 sistemas que utilizan energía solar y/o eólica beneficiando así a unos 250 mil ciudadanos, distribuidos en más de 1000 comunidades aisladas, de indígenas y fronterizas. El avance en la consecución de este objetivo fue de aproximadamente dos tercios del valor total en términos de población; ya que quedaron por ser servidas unos 120.000 habitantes. Según la IAE¹ desde 2010 hasta 2019 se incorporaron sólo unos 97 GWh de capacidad: 9 GWh fotovoltaicos y 88 GWh eólicos. Para 2020 el Anuario estadístico 2021 de Enerdata,² reporta que la producción cayó a 93.000 GWh sin registro de producción eólica o solar.

En el Plan de la Patria 2019-2025 se da continuidad a ésta línea de pensamiento en el Tercer Gran Objetivo Histórico, al plantear como objetivo nacional diversificar la matriz energética nacional, incorporando de manera progresiva fuentes alternativas de energía que favorezcan el uso de combustibles y fuentes de energía alternativas y renovables, fomentando el uso eficiente de la energía eléctrica a través de una cultura de consumo eficiente.

La crisis actual del SEN y las alternativas de solución

Los cortes eléctricos en Venezuela han sido históricamente frecuentes, sin embargo, a partir de año 2019 tomaron mayor envergadura a nivel nacional. El primer gran corte ocurrió el 7 de marzo de 2019, siendo el corte eléctrico más grande en la historia de Venezuela; duró en algunos estados entre cinco y siete días continuos. La causa del apagón fue atribuida a una falla en la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar. El 12 de marzo, se logró restablecer la energía eléctrica en algunas regiones del país y para el 14 de marzo, la energía se había restablecido por completo; aunque cortes menores persistieron durante varios días.

El 25 de marzo ocurrió un segundo gran apagón que dejó sin energía a 16 Estados; de nuevo, la causa fue una falla en la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar. Una semana

más tarde, el 29 de marzo ocurrió un tercer apagón que afectó a 23 estados y que duró más de 4 días. El 9 de abril de ese mismo año, sucedió un cuarto apagón y por último, otro apagón de gran magnitud ocurrió el 22 de julio. Estos apagones afectaron seriamente al país y consecuentemente causaron graves problemas económicos y sociales; en hospitales, clínicas, industrias, transporte, servicios de agua y múltiples disturbios sociales. Se estima que durante ese año se presentaron cerca de 23.800 fallas eléctricas en todo el país causando la afectación de decenas de miles de aparatos eléctricos en hogares y en la industria.

Durante el primer semestre del año 2020 se debió recurrir a programas de corte debido a la inestabilidad del servicio eléctrico, haciéndose recurrentes los cortes de hasta seis horas en diferentes estados y en algunas ciudades se aplicaron cortes de seis horas, dos veces al día. Se estima que en los tres primeros meses de 2020 fueron reportadas unas 17.250 fallas eléctricas.

El origen de las fallas se presenta muy diverso, incluyendo sabotajes,¹⁰⁻¹⁴ corrupción y saqueo de instalaciones^{15,16}, manejos inadecuados de los equipos, eventos naturales adversos^{17,18}, obsolescencia, fallas en la planificación, mantenimiento e inversión,^{11,19} desabastecimiento de combustibles en las centrales termoeléctricas, dificultad para adquirir repuestos debido al bloqueo económico de la nación²⁰ y la desertión de personal capacitado, como resultado de la fuga de personal calificado por la crisis económico-política del país.

El panorama descrito es elocuente muestra de un sistema frágil que requiere urgente intervención para mejorar su estabilidad y evitar un posible colapso total del mismo. Desde luego, no es una intervención sencilla pues son muchos los factores que deben ser enfrentados; sin embargo, uno de los caminos que puede ser emprendido sería la implementación de soluciones que involucren la generación en micro-redes en base a energías renovables, tales como la eólica y la fotovoltaicas. Como hemos dicho antes, el costo de producción de

electricidad a partir de estas fuentes se ha venido reduciendo significativamente, al punto de haber descendido a valores por debajo de los costos de la energía en base a hidrocarburos (termoeléctricas) y ligeramente superior a la hidroeléctrica, cuyo costo se ha incrementado ligeramente en la última década. Pero más importante es el hecho de que los costos de la energía fotovoltaica y eólica se han reducido hasta valores similares al extremo inferior del intervalo de costos de la energía eléctrica producida a base de combustibles fósiles; la tendencia indica que pronto estas curvas se cruzaran a favor de las primeras.

Pero más aún, la generación de energía eléctrica a partir de estas fuentes renovables tiene beneficios insuperables por las tecnologías a base de combustibles fósiles: 1) su ubicuidad, que elimina toda la cadena de transporte y almacenamiento de combustible y 2) su muy bajo impacto sobre el medio ambiente y su gran aporte a la reducción de la “huella de carbono”, tan necesaria para evitar el efecto invernadero causado por los gases producidos por las plantas de generación termoeléctrica a base de combustibles fósiles. En consecuencia es impostergable abordar este camino. La Figura 3 muestra el potencial fotovoltaico medio en Venezuela.²¹

Ahora bien, si desde un punto de vista socio-económico, es imprescindible abordar con urgencia la situación del SEN y producir soluciones de corto, mediano y largo plazo, desde el punto de vista de seguridad y continuidad de la nación es urgente dar una solución de corto plazo y de carácter inmediato al problema del SEN; puesto que de ello dependen las posibilidades de mantener funcionando el país de manera orgánica.

El SEN representa un flanco débil que puede ser vulnerado a todo lo largo de su “espina dorsal” (líneas de transmisión) causando potenciales parálisis en regiones estratégicas. Cualquier sistema como el SEN con una larga “espina dorsal” debe emplear importantes recursos para protegerla de eventos adversos; pero aun así, si algún evento es suficientemente importante para

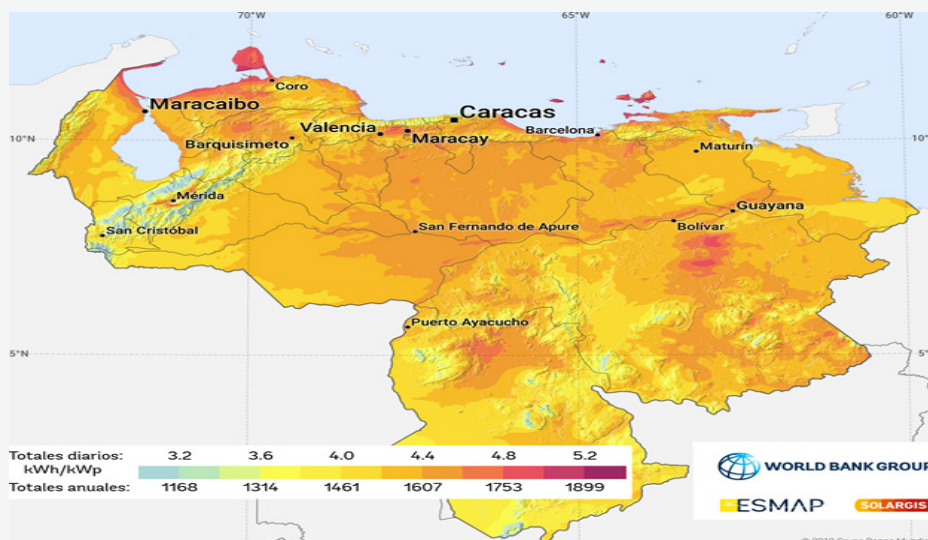


Figura 3.- Potencial fotovoltaico medio para Venezuela

causar un “corte” en la “espin dorsal”, la parálisis es inevitable. ¿Cómo desactivar la potencial amenaza de un evento que vulnere la espin dorsal del SEN y cause una parálisis regional o nacional? La respuesta sin duda es dotar al SEN de redes secundarias o auxiliares y la construcción de nuevas plantas generadoras hidroeléctricas y termoeléctricas a lo largo y ancho de la geografía nacional.

Esta alternativa, ciertamente abordada en los diferentes planes de la patria, se presume extraordinariamente costosa; en recursos económicos, humanos, naturales y muy extensa en tiempo. Una solución alternativa a este dilema podría ser una red de micro-sistemas generadores de energía, conectados al SEN; en caso de desconexión total o parcial, estas micro-redes, a modo de “vasos comunicantes” suplirían, al menos parcialmente, la “salida” del SEN, evitando la parálisis total. En un corto plazo, el aporte de éstas micro-redes sería reducido, siendo significativo sólo en las micro-regiones de influencia; sin embargo, si se generaliza la instalación de micro-redes de generación, de mediano a largo plazo, el aporte de las micro-redes sumará a la estabilidad del SEN, reduciendo el impacto de cualquier evento, grande o pequeño, de origen natural o antrópico.

Desde el punto de vista de los sistemas fotovoltaicos, se ha venido especulando

a cerca de las bondades de los sistemas de micro-redes en varios artículos de corte internacional.

Es así como Xi Zhang,²² un investigador asociado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Imperial College, en el Reino Unido, ha propuesto que las micro-redes de múltiples “islas de energía” pueden aumentar la resiliencia (la capacidad del sistema para absorber perturbaciones y mantener sus funciones) de la red. Las redes de “islas” equilibran las múltiples tecnologías de generación y almacenamiento a nivel local; integrados en la red nacional, pero autónomos, por lo que pueden aislarse de eventos catastróficos.

Por otro lado, desde el punto de vista de estrategia en defensa militar, Lukas Trakimavičius,²³ pone énfasis en la defensa frente a los ciberataques contra las redes eléctricas, que no sólo podrían causar trastornos sociales y económicos, sino también pueden afectar la preparación militar de los países europeos; en caso de un apagón, las luces podrían apagarse tanto en los ayuntamientos como en las instalaciones militares.

La electroquímica en el futuro solar y eólico del país

Los dispositivos de almacenamiento de energía son un requisito clave para el

almacenamiento eficiente y asequible de la energía proveniente de fuentes renovables esporádicas y para mitigar la necesidad de combustibles fósiles. Para satisfacer la demanda actual y futura de dispositivos eléctricos portátiles, los vehículos eléctricos y el almacenamiento de energía estacionario para la red eléctrica, se está impulsando el desarrollo de estos dispositivos de almacenamiento de energía electroquímica.²⁴

Entre todos los dispositivos de almacenamiento de energía, las baterías y los supercapacitores o supercondensadores han llamado mucho la atención debido a su alta eficiencia, excelente eficiencia de retención, densidad de energía ultra alta, densidad de potencia y protección del medio ambiente mediante el desarrollo de tecnologías de energía limpia y verde. Los supercapacitores están experimentando un gran crecimiento en el mercado y se espera que la cuota de mercado aumente en el futuro. En general, los supercapacitores poseen una densidad de potencia más alta que la de las baterías convencionales, mientras que la densidad de energía de las baterías supera a los supercapacitores. Las baterías y los supercapacitores han servido como tecnologías efectivas para dispositivos de almacenamiento sostenible, pero aún enfrentan obstáculos tecnológicos y fundamentales que superar; por lo que requieren una investigación continua para alcanzar el desarrollo de tecnologías sólidas que se adapten a los nuevos requisitos energéticos.

Los condensadores electroquímicos tienen dos mecanismos para almacenar electricidad: capacitancia de doble capa y pseudocapacitancia. La capacitancia de doble capa se basa en mecanismos de adsorción iónica, mientras que la pseudocapacitancia es un proceso electroquímico que ocurre cuando los iones se adsorben electroquímicamente en la superficie o cerca de la superficie de un material con una transferencia de carga faradaica asociada.²⁴

En general, las baterías se clasifican por su química y por su facilidad de recarga.

De acuerdo a su facilidad de recarga, las baterías electroquímicas tienen dos grandes categorías, baterías primarias y secundarias. Una batería primaria es aquella que no se puede recargar fácilmente después de un uso. Por otro lado, una batería secundaria se puede recargar fácilmente a su estado original previo a la descarga. Las baterías secundarias más comunes son las basadas en litio, plomo y níquel. Existe un gran número de baterías secundarias comercialmente disponibles en el mercado incluyendo las de plomo-ácido (Pb-ácido), litio (LiB), las de níquel-cadmio (NiCd), las de níquel-hidruro de metal (NiMH), las de azufre-sodio (Na-S) y baterías de flujo. Las baterías de plomo-ácido, las de iones de litio y las de níquel son actualmente los tipos de batería más utilizados en todo el mundo. Algunas estimaciones calculan su participación total en el mercado mundial de baterías en alrededor del 95 por ciento. De las tres, las baterías de iones de litio (Li-ion) son las de mayor participación en el mercado²⁵.

Según un informe de 2019 de Global Battery Alliance (GBA)²⁶, una asociación público-privada iniciada por el Foro Económico Mundial (WEF) en 2017, las baterías podrían permitir el 30 por ciento de las reducciones requeridas en las emisiones de carbono en los sectores del transporte y la energía, permitirían acceso a la electricidad a 600 millones de personas que actualmente no tienen acceso y crear 10 millones de empleos seguros y sostenibles en todo el mundo, más de 50 por ciento de los cuales estarán en economías emergentes.

De acuerdo con el Escenario de Desarrollo Sostenible (SDS) de la Agencia Internacional de Energía (AIE), el futuro de la energía global está en un almacenamiento de electricidad mejor y más barato, particularmente la capacidad de cumplir con los objetivos climáticos y energéticos internacionales clave. Con eso en mente, la agencia con sede en París ha estimado que para 2040 se requerirán cerca de 10 000 gigavatios-hora (GWh) de baterías en todo el sistema energético y otras formas de almacenamiento de energía en todo el mundo, lo que representa 50 veces el tamaño del mercado actual²⁷.

Baterías primarias

Tipo de Batería	Ánodo	Cátodo	Mecanismo de reacción
Leclanché	Zn	MnO ₂	$Zn + 2MnO_2 \rightarrow ZnO \cdot Mn_2O_3$
Magnesium	Mg	MnO ₂	$Mg + 2MnO_2 + H_2O \rightarrow Mn_2O_3 + Mg(OH)_2$
Alkaline MnO ₂	Zn	MnO ₂	$Zn + 2MnO_2 \rightarrow ZnO + Mn_2O_3$
Mercury	Zn	HgO	$Zn + HgO \rightarrow ZnO + Hg$
Mercad	Cd	HgO	$Cd + HgO + H_2O \rightarrow Cd(OH)_2 + Hg$
Silver oxide	Zn	Ag ₂ O	$Zn + Ag_2O + H_2O \rightarrow Zn(OH)_2 + 2Ag$
Zinc/O ₂	Zn	O ₂	$Zn + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow ZnO$
Zinc/air	Zn	Ambient air	$Zn + (\frac{1}{2}O_2) \rightarrow ZnO$
Li/SOCl ₂	Li	SOCl ₂	$4Li + 2SOCl_2 \rightarrow 4LiCl + S + SO_2$
Li/SO ₂	Li	SO ₂	$2Li + 2SO_2 \rightarrow Li_2S_2O_4$
LiMnO ₂	Li	MnO ₂	$Li + Mn^{IV}O_2 \rightarrow Mn^{IV}O_2(Li^+)$
Li/FeS ₂	Li	FeS ₂	$4Li + FeS_2 \rightarrow 2Li_2S + Fe$
Li/CF _x	Li	CF _x	$xLi + CF_x \rightarrow xLiF + xC$
Li/I ₂ ^e	Li	I ₂ (P2VP)	$Li + \frac{1}{2}I_2 \rightarrow LiI$

Baterías secundarias

Tipo	Ánodo	Cátodo	Mecanismo de reacción
Lead-acid	Pb	PbO ₂	$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$
Edison	Fe	Ni oxide	$Fe + 2NiOOH + 2H_2O \rightarrow 2Ni(OH)_2 + Fe(OH)_2$
Nickel-cadmium	Cd	Ni oxide	$Cd + 2NiOOH + 2H_2O \rightarrow 2Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2$
Nickel-zinc	Zn	Ni oxide	$Zn + 2NiOOH + 2H_2O \rightarrow 2Ni(OH)_2 + Zn(OH)_2$
Nickel-hydrogen	H ₂	Ni oxide	$H_2 + 2NiOOH \rightarrow 2Ni(OH)_2$
Nickel-metal hydride	MH ^f	Ni oxide	$MH + NiOOH \rightarrow M + Ni(OH)_2$
Silver-zinc	Zn	AgO	$Zn + AgO + H_2O \rightarrow Zn(OH)_2 + Ag$
Silver-cadmium	Cd	AgO	$Cd + AgO + H_2O \rightarrow Cd(OH)_2 + Ag$
Zinc/chlorine	Zn	Cl ₂	$Zn + Cl_2 \rightarrow ZnCl_2$
Zinc/bromine	Zn	Br ₂	$Zn + Br_2 \rightarrow ZnBr_2$
Lithium-ion	Li _x C ₆	Li _(1-x) CoO ₂	$Li_xC_6 + Li_{(1-x)}CoO_2 \rightarrow LiCoO_2 + C_6$
Lithium/manganese dioxide	Li	MnO ₂	$Li + Mn^{IV}O_2 \rightarrow Mn^{IV}O_2(Li^+)$
Lithium/iron disulfide ^d	Li(Al)	FeS ₂	$2Li(Al) + FeS_2 \rightarrow Li_2FeS_2 + 2Al$
Sodium/sulfur ^d	Na	S	$2Na + 3S \rightarrow Na_2S_3$
Sodium/nickel chloride ^d	Na	NiCl ₂	$2Na + NiCl_2 \rightarrow 2NaCl + Ni$

El desarrollo y evolución del mercado de las baterías y sus aplicaciones ha dado un gran impulso a nuevos desarrollos en tipos de baterías; así en poco menos de un siglo la clasificación de las baterías primarias y secundarias se ha diversificado en gran manera. Las tablas siguientes muestran un resumen compacto de los diferentes tipos de baterías, primarias y secundarias, más reconocidas. Estas tablas no muestran otros tipos de baterías como las denominadas baterías de reserva, las de combustibles y otras que están en desarrollo²⁸.

En Venezuela existen unas pocas empresas

que se dedican a la fabricación de baterías (Acumuladores Duncan C.A., Titan C.A. y Fulgor C.A., en el centro industrial del país); principalmente del tipo plomo-ácido, para su uso en transporte y del tipo estacionario de respaldo eléctrico. Estas empresas realizan la recolección de las baterías usadas (además Fundación de Metales C.A. en Carabobo.) en toda la geografía nacional y se encargan de su reciclaje. Sin embargo, existe una cantidad ingente de baterías que no son recicladas, bien porque son producto de importación, porque no existe compromiso firmado de recolección entre el proveedor de las mismas y el usuario, o porque rechazan recibirlas

en las revendedoras, presumiblemente por su bajo valor agregado. Es de resaltar que una gran parte de este pasivo corresponde a las empresas del Estado Venezolano, que consideran a las baterías como una propiedad que debe ser desincorporadas del inventario de bienes de la nación para poder ser entregadas a las empresas recuperadoras. Por otro lado, es necesario recabar información respecto de la capacidad de reciclaje las empresas dedicadas a este procedimiento. Adicionalmente, se debe tomar en cuenta que dichas empresas tienen sus instalaciones ubicadas en el centro del país, lo cual representa costos de transporte significativos.

En el caso de otros tipos de baterías, diferentes a las de plomo-ácido, como son las de níquel-cadmio, níquel-hidruro metálico (Ni-M), almacenamiento de plomo, azufre-sodio, baterías de flujo y baterías de iones de litio (LIB), no existen en el país empresas que se encarguen de la recolección y reciclaje de las mismas.

Como hemos visto, más allá de iniciativas privadas ya mencionadas, no se conoce que

exista en el país otra infraestructura dedicada a la recolección y reciclaje de baterías. Por otro lado, en la búsqueda realizada, sólo fue posible encontrar tres trabajos²⁹⁻³¹ de origen académico relacionadas con iniciativas de investigación y desarrollo en el ámbito del reciclaje de baterías en Venezuela.

En relación con los proyectos de investigación en el área de desarrollo de baterías sólo fue posible encontrar, dos referencias^{33,34}, de artículos que reportan trabajos de investigación en este campo.

Estos resultados, demuestran el poco trabajo que se realiza en el país en el área de la investigación y desarrollo de éstos dispositivos de acumulación de energía eléctrica y sin duda marcan el grado de atraso y dependencia tecnológica del país en este segmento de la producción y almacenamiento de energía eléctrica. Si queremos verdaderamente tener algún grado de independencia tecnológica, debe ser en este tipo de dispositivos, que le permiten a la sociedad mundial actual el dinamismo necesario para su organización y progreso.

Conclusiones

La energía eléctrica es el fluido vital de la sociedad actual. Sin ella se produce una parálisis casi total de la sociedad actual y su escasez causa retrasos ingentes en su desarrollo. Apropiarse del conocimiento fundamental y del “saber cómo hacer” los dispositivos que permiten producirla y almacenarla es una tarea impostergable, pues de ella depende el grado de independencia tecnológicas de las sociedades del siglo 21.

Venezuela posee ingentes recursos naturales para el desarrollo de una red eléctrica alimentada por diversas fuentes generadoras de energía eléctrica: hidroeléctrica, solar y eólica. El último plan de la patria (2019-2025) plantea la integración de sistemas de generación a partir de fuentes renovables; es necesario impulsar tales planes; sin embargo, para poder ejecutarlos es necesario formar personal en las respectivas áreas y organizar el aparato del estado para lograr tal objetivo.

Para alcanzar los objetivos planteados en este plan estratégico se requiere la formación de profesionales especializados y bien calificados capaces de asumir las tareas de la construcción, interconexión y puesta a punto y mantenimiento de las micro-redes. Estas micro-redes requerirán amplios conocimientos para el desarrollo de sistemas de transmisión, interconexión y acumulación de energía. En este sentido, será necesaria estimular la investigación y desarrollo, para apropiarse del “saber como hacer” y para el desarrollo de nuevas invenciones que nos permitan ubicarnos en la frontera del conocimiento para poder explotar nuestros recursos con el mínimo de dependencia tecnológica.

Si queremos verdaderamente tener algún grado de independencia tecnológica en el

segmento de la producción y acumulación de energía eléctrica, es necesario incentivar la formación de personal en el área de la energía electroquímica.

Referencias

- 1- International Energy Agency,) <https://www.iea.org/countries/venezuela>.
- 2- Energía y clima mundial - Anuario estadístico 2021, Enerdata. <https://datos.enerdata.net/electricidad/estadisticas-mundiales-produccion-electricidad.html>.
- 3- Sistema Interconectado Nacional, líneas de transmisión e interconexión. CORPOELEC. <http://www.corpoelec.gov.ve/transmision>.
- 4- "Renewable power generation costs in 2020", International Renewable Energy Agency (IRENA) ISBN: 978-92-9260-348-9" (2021). Disponible en
- 5- COP26 Reaches Consensus on Key Actions to Address Climate Change, UN Climate Press Release / 13 Nov, 2021 <https://unfccc.int/news/cop26-reaches-consensus-on-key-actions-to-address-climate-change>.
- 6- Factor CO2, "COP26: 40 países aceleran el acceso a la tecnología limpia", <https://www.factorco2.com/es/cop26-40-paises-aceleran-el-acceso-a-la-tecnologia-limpia/noticia/8547>.
- 7- Agence France-Presse (AFP) Los acuerdos de la cumbre del G20 en Roma: clima, vacunas, fiscalidad. France24 <https://www.france24.com/es/minuto-a-minuto/20211031-los-acuerdos-de-la-cumbre-del-g20-en-roma-clima-vacunas-fiscalidad>
- 8- Observatorio del Principio 10, Comisión Económica para América Latina (CEPAL) <https://observatoriop10.cepal.org/es/tratados/convencion-marco-naciones-unidas-cambio-climatico>.
- 9- Alejandro López-González (2021), "Energías Renovables en Venezuela Experiencias y Lecciones para un Futuro Sostenible", La Cueva del Elefante, Segunda Edición, ISBN: 9798670221443
- 10- Sabotaje interno en gerencia de Corpoelec impide buen servicio (11/12/2014), Los #Sinluz en la Prensa, <http://www.lossinluzenlaprensa.com/sabotaje-interno-en-gerencia-de-corpoelec-impide-buen-servicio/>
- 11- Ministro venezolano revela que sabotaje a Corpoelec pudo ser con bomba (08/11/17), Telesur, <https://www.dailymotion.com/video/x68ca50>,
- 12- Corpoelec denunció actos de sabotajes en el servicio eléctrico (06/03/2020) , Noticiero Venevisión, <http://www.noticierovenevision.net/noticias/nacional/corpoelec-denuncio-actos-de-sabotajes-en-el-servicio-electrico>.
- 13-Ángel Bermúdez, Venezuela sin luz: cómo funciona su sistema eléctrico y por qué colapsó, BBC News Mundo, <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-47532126>.
- 14- Gobierno denuncia nuevo sabotaje al Sistema Eléctrico Nacional, Con el Mazo Dando (05/05/2020), <https://mazo4f.com/gobierno-denuncia-nuevo-sabotaje-al-sistema-electrico-nacional>.

- 15- Oly Millán Campos (24/04/2019), "El Saqueo Continuo del Sistema Eléctrico Nacional", Aporrea, (<https://www.aporrea.org/energia/a277997.html>).
- 16- Crisis eléctrica caotiza al país: ¿Cuáles son las verdaderas causas? (16/10/2018), Analítica.com, (Consultada 26 de marzo de 2021) <https://www.analitica.com/actualidad/actualidad-nacional/crisis-electrica-venezuela-cuales-son-las-causas/>,
- 17- Venezuela militariza el sistema eléctrico (24 abril, 2013), Caracas/EFE, (Consultada 26 de marzo de 2021) https://www.larepublica.net/noticia/venezuela_militariza_el_sistema_electrico.
- 18- Los efectos del fenómeno "El Niño" en Venezuela (23 enero 2016), Telesur, (Consultada 28 de marzo de 2021) <https://www.telesurtv.net/news/Los-efectos-del-fenomeno-El-Nino-en-Venezuela-20160123-0029.html>.
- 19- Enrique La Marca, Marelis A Rriojas, Francisco Costa, Represas Hidroeléctricas En Los Andes Venezolanos: Problemática Ambiental, Crisis Energética Y Energías Alternativas, Saber, Universidad de Oriente, Venezuela. Vol. 30: 582-598. (2018) 583, <https://www.researchgate.net/publication/330281753>.
- 20- María Camila Hernández, Las sanciones de Estados Unidos a Venezuela: un arma cada vez más letal, France 24, , [<https://www.france24.com/es/20190214-venezuela-pdvsa-sanciones-estados-unidos>].
- 21- Global Solar Atlas, The World Bank Group. Solargis s.r.o., (Consultada 28 de enero de 2022) <https://globalsolaratlas.info/map?c=6.980954,-65.67627,6&s=10.53102,-66.906738&m=site>.
- 22- Xi Zhang, "Multi-energy "island" Microgrids can increase grid resilience", (Consultada March 11, 2020) <https://energypost.eu/multi-energy-island-microgrids-can-increase-grid-resilience>.
- 23- Lukas Trakimavičius, "Cyberattacks: the military considers micro grids as the answer", (Consultada March 1, 2019), <https://energypost.eu/?s=Cyberattacks%3A+the+military+considers+micro+grids+as+the+answer>.
- 24- Feng Li, Lei Wen, Hui-ming Cheng (2021), "Novel Electrochemical Energy Storage Devices: Materials, Architectures, and Future Trends", WILEY-VCH, Weinheim, Germany. ePDF ISBN: 978-3-527-82104-4.
- 25- Isidor Buchmann, "Global Battery Markets", The Battery University, (Consultada 28 de enero de 2022), <https://batteryuniversity.com/article/bu-103-global-battery-markets>.
- 26- A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030 Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation. [https://www3.weforum.org/docs/WEF_A_Vision_for_a_Sustainable_Battery_Value_Chain_in_2030_Report.pdf].
- 27- Cary Springfield, "The Outlook For The Global Battery Market", International Banker (October 5, 2021.) Disponible en <https://internationalbanker.com/brokerage/the-outlook-for-the-global-battery-market/>.
- 28- Thomas B. Reddy & David Linden (Eds), (2011) Linden's Handbook Of Batteries, Fourth Edition, McGraw-Hill Companies, Inc. ISBN: 978-0-07-162421-3.

- 29- Ana Elisa Azpúrua Ramírez, Debbie Esayag Marques, "Diagnóstico del Manejo de Las Baterías de Plomo-Ácido en la C.A. Metro de Caracas y Proposición de Alternativas de Solución a las Irregularidades Identificadas", Tesis de grado, Universidad Metropolitana, Caracas, Febrero 2.001. [<http://repositorios.unimet.edu.ve/docs/16/TA145A96R3.pdf>].
- 30- Angelina Correia de Soto y María Luisa Martín de Armando, "Propuesta de un plan de manejo de baterías usadas de teléfonos celulares en Venezuela", REVISTA INGENIERÍA UC. Vol. 12, No 2, 32-41, 2005, [<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/v12n2/12-2-4.pdf>].
- 31- Vitaambiente, (sep 18, 2015) [<http://www.vitaambiente.com/crean-planta-para-reciclaje-de-baterias/>] vida verde.
- 32- Vida+Verde, (Consultada 29 de enero de 2022), [<https://vidamasverde.com/2012/universidad-venezolana-disena-planta-para-reciclar-materiales-toxicos-de-pilas-y-baterias-gastadas/>].
- 33- Colt, G, Márquez, Jairo, & Márquez, Olga. (2010). "Evaluación de una celda Redox de Vanadio". Universidad, Ciencia y Tecnología, 14(56), 183-188., [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212010000300005&lng=es&tlng=es].
- 34- Fernández, Herman, Martínez, Abelardo, Guzmán, Víctor, & Giménez, María. (2009). "Simulación mediante pspice de un modelo simplificado y de alta eficiencia de una batería de plomo - ácido". Universidad, Ciencia y Tecnología, 13(52), 231-237. 48212009000300006&lng=es&tlng=es].