

Oportunidades y desafíos para la integración de almacenamiento electroquímico en las redes eléctricas centroamericanas

Opportunities and challenges to integrate electrochemical storage in central american power grids

Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez¹, Carlos Meza², Sergio Morales-Hernández³

Fecha de recepción: 28 de agosto de 2020
Fecha de aprobación: 6 de noviembre de 2020

Gómez-Ramírez, G.A; Meza, C; Morales-Hernández, S.
Oportunidades y desafíos para la integración de almacenamiento electroquímico en las redes eléctricas centroamericanas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-3 Julio-Setiembre 2021. Pág 70-82.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5352>

- 1 Escuela de Ingeniería en Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: ggomez@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-9195-072X>
- 2 Escuela de Ingeniería en Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: cmeza@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7374-505X>
- 3 Escuela de Ingeniería en Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: smorales@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-2136-0382>



Palabras clave

Almacenamiento electroquímico; generación eléctrica intermitente; G2V; V2G; vehículos eléctricos; sistemas estacionarios de generación eléctrica; almacenamiento.

Resumen

La integración de sistemas estacionarios y de los vehículos eléctricos como almacenamiento electroquímico en la red eléctrica, traerán consigo una serie de acciones en los sistemas eléctricos de potencia a fin de robustecer la red existente, diversificar las mallas energéticas actuales y lograr una contribución significativa ante los requerimientos energéticos de la región y los problemas asociados debido al cambio climático. El presente artículo expone las principales oportunidades y desafíos de su integración, muestra la evolución y situación actual de la matriz eléctrica de Centroamérica. La región presenta condiciones favorables para permitir una penetración de diversas tecnologías de almacenamiento en combinación con generación de electricidad intermitente lo cual representa una nueva consideración en el análisis. Diversas tecnologías de almacenamiento son expuestas que, a pesar de ser antiguas en su descubrimiento y uso, hoy se presentan como una oportunidad para la producción masiva de energía eléctrica renovable. Por último, se analizarán las formas en que dichas tecnologías pueden interactuar con la red eléctrica como unidades de almacenamiento y carga. Finalmente, se identificarán las principales oportunidades y desafíos de la integración de sistemas de almacenamiento electroquímico en la red eléctrica.

Keywords

Electrochemical storage; intermittent power generation; G2V; V2G; electric vehicles; stationary power generation systems; storage.

Abstract

Stationary systems integration and electric vehicles (in storage conditions) will require actions to improve the existing grid in power electrical systems. To diversify current energy grid and achieve a significant contribution to energies requirements and associated problems due to climate change in Central American region. This article shows main opportunities and challenges in integration, it indicates the evolution and current situation in area. Region presents satisfactory conditions to penetration of several storage technologies with intermittent electricity generation combinations, which it represents a new issue in analysis and studies. Much storage technologies are exposed that but nowadays, they are presented as an opportunity to increase renewable electricity's production. Therefore, actual technologies must interact with actual grid, storage, intermittent renewable generation, and electrical vehicles. Finally, main opportunities and challenges in storage and electrical vehicles penetration will recognized in power systems analysis.

Introducción

Centroamérica es una región idónea para el desarrollo de soluciones energéticas carbono neutro ya que posee una gran variedad de recursos energéticos renovables y ha explotado poco sus escasos recursos fósiles [1]. Si bien es cierto la mayoría de sus redes eléctricas han dependido de centrales termoeléctricas con combustibles fósiles, en los últimos años todos los

países centroamericanos han incluido más fuentes de energía renovable. Esta transición no está exenta de desafíos, siendo el más importante la intermitencia intrínseca que presentan algunas fuentes de energía renovable.

Las plantas de generación que están conectadas a la red eléctrica realizan procesos de transformación de una fuente de energía a electricidad. Algunas tecnologías renovables dependen de fuentes de energía que no son constantes. Este es el caso de las plantas hidroeléctricas a filo de agua, fotovoltaicas y eólicas. La electricidad generada por dichas plantas depende de un flujo (agua, radiación solar, viento) que es variable dado que depende de condiciones climáticas que tienen un comportamiento dinámico caótico y por lo tanto difíciles de predecir.

Por otro lado, el sistema eléctrico debe asegurar en todo el momento el correcto balance entre generación y consumo dado que un eventual desbalance puede ocasionar el colapso del sistema y por lo tanto la interrupción del suministro eléctrico. En este sentido, si bien es cierto que las plantas solares fotovoltaicas y eólicas presentan un bajo impacto ambiental y son necesarias para alcanzar la carbono neutralidad en el sistema eléctrico, hace más complejo alcanzar el balance generación-consumo, además de potencialmente poner en riesgo la seguridad del sistema.

Incluir sistemas de almacenamiento de energía en la red eléctrica permite asegurar un mayor control sobre la entrega de energía renovable intermitente. El almacenamiento electroquímico representa una de las tecnologías de almacenamiento más maduras y que ha mantenido una reducción de costos sostenida en los últimos años, tendencia que de acuerdo con [28] se estaría manteniendo hasta el 2050. Además de sistemas de almacenamiento electroquímico estacionarios es también posible disponer del almacenamiento incluido en los vehículos eléctricos para contribuir con la gestión y control de energía renovable.

El presente artículo tiene como objetivo presentar las principales oportunidades y desafíos en la integración de sistemas estacionarios y con vehículos eléctricos de almacenamiento electroquímico en la red eléctrica Centroamericana. De esta forma, en la sección siguiente se presenta la evolución y la situación actual de la matriz eléctrica en los distintos países de Centroamérica de forma tal que se pueda apreciar el rol cada vez más importante que tienen las fuentes de energías renovables intermitentes en la Región. Posteriormente, se presentarán las principales tecnologías de almacenamiento estacionario electroquímico disponible hoy en día. Luego, se analizarán las formas en las que los vehículos eléctricos pueden interactuar con la red eléctrica como unidades de almacenamiento y carga. Finalmente, y con base en lo expuesto en las secciones anteriores, se identificarán las principales oportunidades y desafíos en la integración de sistemas de almacenamiento electroquímico en la red eléctrica.

Evolución y estado actual de las matrices eléctricas en Centroamérica

El istmo centroamericano, conformado por Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Panamá, está eléctricamente interconectado por medio de una red de transmisión de potencia dedicada denominada SIEPAC, [1], [2]. Esta red, administrada por un ente privado transnacional, permitió el desarrollo de un mercado eléctrico en donde los países centroamericanos pueden intercambiar energía [2].

El mercado eléctrico centroamericano se consolidó en un momento histórico en donde todos los países estaban experimentando un crecimiento económico sostenido que iba acompañado de un aumento en la cobertura eléctrica y por lo tanto en el consumo de energía, [1]. Dicha situación fue uno de los elementos que, tal y como se describe en [1] y en [3], motivó la implementación de algunas reformas del sector eléctrico.

Los costos elevados del petróleo, la reducción en los costos de la tecnología renovable y los programas para incentivar las fuentes renovables impulsaron un crecimiento acelerado de fuentes de energía renovable en los primeros años del siglo XXI. De acuerdo con el reporte del 2020 de la CEPAL, [4], el 75% de la energía eléctrica generada por los países interconectados al SIEPAC en el 2018 provino de fuentes renovables. La figura 1 muestra la evolución de la capacidad instalada de fuentes de energía renovable y de las fuentes de energía térmica en los países del SIEPAC. Se aprecia como el crecimiento en las fuentes de energía renovables fue significativamente mayor que las fuentes de energía no renovable.

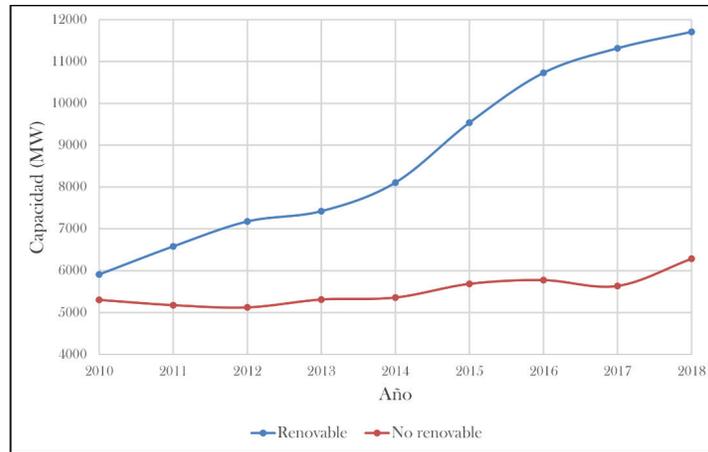


Figura 1. Evolución de la capacidad total por tipo de fuente de energía para los países interconectados al SIEPAC. Fuente: Elaboración propia con datos tomados de [4].

El crecimiento en la capacidad instalada de fuentes de energía renovable no ocurrió con la misma razón de crecimiento en las distintas tecnologías que se utilizaron. En la figura 2 se aprecia la curva de la capacidad instalada normalizada para distintas fuentes de energía en los países del SIEPAC. Se puede observar cómo existió un crecimiento más acelerado en la instalación de plantas eólicas y fotovoltaicas, ya que presentan una pendiente de crecimiento mayor que las otras fuentes de energía. La figura 3 ilustra, con datos absolutos, el crecimiento en la capacidad instaladas en las plantas eólicas y fotovoltaicas. El desarrollo acelerado de estas tecnologías se puede explicar dado a la tendencia sostenida en la reducción de los costos y los tiempos más cortos de implementación.

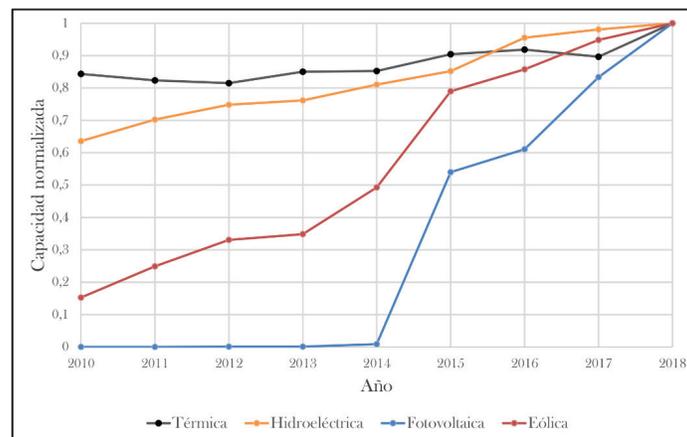


Figura 2. Capacidad normalizada instalada por tipo de fuente de energía para los países del SIEPAC. Fuente: Elaboración propia con datos tomados de [4].

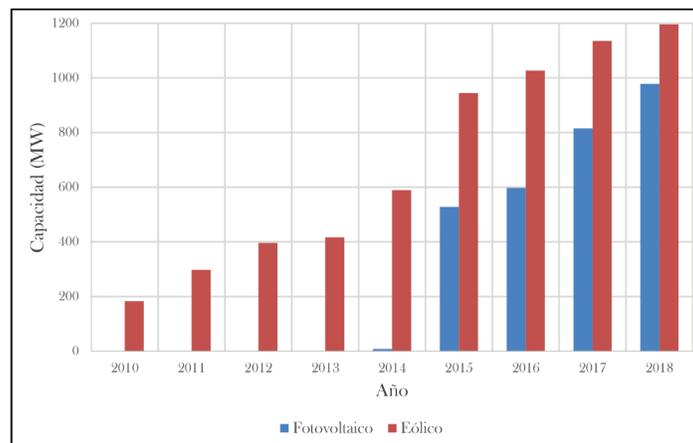


Figura 3. Evolución de la capacidad instalada en los países del SIEPAC en instalaciones fotovoltaicas y eólicas. No se toma en cuenta la generación distribuida para autoconsumo. Fuente: Elaboración propia con datos tomados de [4].

Si bien es cierto, la generación de energía con tecnología fotovoltaica y eólica tiene un bajo impacto ambiental y está asociada a emisiones nulas de carbono durante su operación tiene el inconveniente que es intermitente, esto es, produce electricidad de forma variable de acuerdo con las condiciones ambientales existente que varían de forma diaria y estacional. Esta característica representa un desafío para los sistemas eléctricos que tienen como principal objetivo mantener en todo momento el balance entre la generación y el consumo. El efecto de las fluctuaciones de la potencia eólica y solar puede ser mitigado por medio de sistemas de almacenamiento de energía. De esta forma, la energía producida en exceso y que no es consumida instantáneamente sería almacenada para luego ser utilizada cuando existe un faltante. Esto significa que el binomio generador fotovoltaico/eólico + almacenamiento operarían como una planta virtual que entrega energía de forma constante, sin fluctuaciones. El almacenamiento provee una herramienta de control efectiva sobre las fuentes de energía intermitentes. Existen distintas formas en las que se puede almacenar energía eléctrica que se presentarán en la siguiente sección.

Descripción del Sistema de Potencia en Centroamérica

El sistema eléctrico de Centroamérica está caracterizado por ser muy diverso en sus fuentes de generación. Cuenta con más de 650 centrales de generación de electricidad entre las más importantes son: hidroeléctricas, eólicas, solar, geotérmica y un alto componente de generación por combustibles fósiles (térmica). Cada una de ellas está interconectada a una extensa red de transmisión desde Guatemala hasta Panamá con cerca de 2200 barras en niveles de tensión de 230, 138 kV hasta la baja tensión interconectada con México con un enlace de 225 MW en 400 kV. El sistema cuenta con más de 2250 líneas de transmisión con alrededor de 1200 transformadores de potencia funcionando como elevadores y reductores de acuerdo con el requerimiento. Asimismo, cerca de 140 capacitores compensan la potencia reactiva requerida por las cargas. Cabe destacar, que se alimentan alrededor de 850 cargas. Por lo tanto, es importante destacar los siguientes aspectos para la integración de almacenamiento y su combinación con las fuentes de generación intermitente en la región:

Integración de Generación Eléctrica Intermitente en la Red de Transmisión.

La red eléctrica presenta grandes oportunidades debido a la riqueza en cuanto al recurso eólico, solar y marino. Asimismo, la infraestructura de la red permite una penetración tanto en distribución como en transmisión la cual debe ser valorada. Debido a los niveles de tensión en toda la región se deben ubicar las zonas con grandes posibilidades de integración y aprovecharla incluso como generación local.

Posibilidades de integración de Generación Intermitente junto con almacenamiento.

Dado el potencial de generación de las fuentes renovables no intermitentes en la región es posible aprovechar los excedentes para almacenamiento de la energía eléctrica en grandes centros de baterías. De esta manera se lograría disminuir la producción de electricidad por combustibles fósiles. De esta forma, la energía generada por medios intermitentes representaría un aporte importante a la matriz energética de la región optimizando el uso de los recursos de generación.

¿Puede el almacenamiento contribuir a la estabilidad del sistema eléctrico de la región?

La integración eléctrica de los países supone problemas de la estabilidad del sistema ante las perturbaciones en la red. El almacenamiento combinado con la generación intermitente puede ser una opción importante para lograr mantener en dado caso el balance de la potencia de generación-carga, de igual manera el suministro de potencia activa y reactiva entre los nodos de interconexión, esto con el fin de mejorar la estabilidad transitoria, de frecuencia y de tensión respectivamente. Analizar puntos estratégicos para la inserción de los centros de almacenamiento puede contribuir grandemente en la estabilidad del sistema y de esta manera minimizar el riesgo de apagón o colapso del sistema.

Tecnologías almacenamiento integrado a los sistemas eléctricos de potencia

Los sistemas de almacenamiento ofrecen importantes beneficios para un sistema eléctrico. Por ejemplo, Kleinberg et. Al en [5] menciona las siguientes aplicaciones del almacenamiento en los sistemas eléctricos: regulación del sistema, reserva rápida, aplanamiento de picos de potencia ("*peak shaving*"), nivelación de cargas, aplazamiento de la capacidad de generación y nivelación de la capacidad de transmisión. Esto es, los sistemas de almacenamiento de energía mejoran la entrega de potencia ininterrumpida y de alta calidad al usuario final antes los posibles comportamientos estocásticos e inciertos que se pueden producir en las distintas etapas de la cadena de suministro de energía eléctrica [5].

La flexibilidad añadida al sistema eléctrico que ofrece el almacenamiento lo hace un buen complemento para los centrales de generación renovable de potencia intermitente [6]. Existen distintas tecnologías de almacenamiento que atienden distintas necesidades y capacidades de almacenamiento de energía y de entrega de potencia. Una de las formas más antiguas de almacenamiento de energía en el sector eléctrico es aprovechando la energía potencial que ocurre en

1. Bombeo hidráulico

La primera planta de bombeo se construyó en 1929. Representa el 96% de la capacidad instalada de almacenamiento de energía en el mundo. Existen alrededor de 200 plantas de bombeo en el mundo para una potencia nominal total de alrededor de 150 GW [7].

2. Aire comprimido

Descompresión de un gas previamente comprimido a través de una turbina para recuperar dicha energía. Sólo dos plantas comerciales con aire comprimido. una de 290 MW construida en Hundorf, Alemania en 1978 y una segunda de 110 MW en McIntosh, Alabama, USA. Es específico al sitio. [6]

3. Volante de inercia

Almacenamiento cinético en una masa giratoria. Se acelera para almacenar y se frena para almacenar energía. Las capacidades típicas rondan los 3kWh a 133 kWh. Recientemente se han usado para almacenamiento en la red.

4. Hidrógeno electrólisis

La electrólisis es el proceso en donde el agua se divide en hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno producido por la electrólisis puede utilizarse para generar electricidad (celdas de combustible).

5. Baterías de flujo

La energía se almacena en disoluciones de electrolitos contenido en dos tanques diferenciados. Presenta una recarga rápida. El dimensionamiento de potencia y su capacidad se tratan de manera independiente. Capacidades típicas son de 100 kWh a 1MWh. Existen varias decenas de instalaciones de almacenamiento en el mundo.

6. Baterías de sales fundidas

Batería electroquímica que opera a altas temperaturas. Es fabricada con materiales económicos. Electrolítico sólido con uno de sus electrodos en estado líquido (fundido). Opera a temperatura superiores a los 300 °C.

7. Baterías electroquímicas

El principal problema con las baterías electroquímicas es que se convertirán en desechos tóxicos a futuro, además, brindan una menor autonomía como reservorio de energía si se comparan con los métodos utilizados en los vehículos de combustión interna. Sin embargo, actualmente se está trabajando en las bio-baterías, basadas en componentes biológicos que generan bajas corrientes eléctricas [26,27]. Las baterías electroquímicas pueden integrarse naturalmente a la red eléctrica por medio de vehículos eléctricos. Los Vehículos Eléctricos (VEs), integrados de forma masiva en la red eléctrica pueden presentar dos condiciones: en modo de almacenamiento para *entregar* energía a la red (V2G) o en modo de carga (G2V) para *consumir* potencia. Ambos casos son importantes para el análisis de cargabilidad del sistema pues esta puede afectar las condiciones operativas del sistema de potencia. Su integración masiva puede afectar la estabilidad tanto transitoria, de frecuencia, tensión y pequeña señal.

Los tipos de baterías electroquímicas principales se indican a continuación:

- *Ácido plomo (Pb ácido)*: son baterías de tecnología antigua. Presentan un alto riesgo por utilizar sustancias ácidas. Sus principales desventajas son su baja relación de energía almacenada versus su peso, y su baja relación de energía almacenada versus volumen. No son una solución económica para los vehículos eléctricos.
- *Níquel Cadmio (NiCd)*: su tecnología aumentó su vida útil gracias a un incremento en el número de ciclos de carga y descarga. Sin embargo, su principal aspecto negativo es el uso de Cadmio, el cual es un metal pesado muy contaminante. Además, presentan el

“efecto memoria” que básicamente es una reducción de su capacidad de carga debido a procesos de cargas incompletas, es decir, que, si la batería no se carga completamente, irá reduciendo su capacidad de carga total.

- *Níquel Hidruro metálico (NiMH)*: estas baterías son similares a las de NiCd en cuanto a su construcción y operación, sin embargo, casi no presentan “efecto memoria”, lo cual le da más ventajas a esta tecnología con respecto a las anteriores.
- *Ión Litio (Li-ion)*: tienen una gran capacidad de almacenamiento de energía, así como una alta relación de densidad de energía versus peso. Sin embargo, su costo, sobrecalentamiento y baja vida útil, han reducido su uso.
- *Polímero Ión Litio (LiPO)*: estas baterías tienen un ciclo de vida mayor que las de Li-ion, sin embargo, su estabilidad se ve comprometida cuando se dan sobrecargas en sus ciclos de carga y descarga, por lo que requieren de una circuitería electrónica adicional para evitar problemas.
- *Cloruro de Níquel Sódico (NaNiCl)*: se conoce comercialmente como “batería cebra”. Tiene un amplio rango de operación en temperatura (desde 270 hasta 350 grados Celsius), así como una alta densidad de energía almacenada. Sin embargo, deben considerarse los aspectos como la seguridad y el almacenamiento por periodos extensos.

En la figura 4 se muestran las diferentes tecnologías de baterías, comparando la relación entre energía y peso y energía y volumen [26, 27]. En la actualidad, las tecnologías de los vehículos han alcanzado mejoras relacionadas con el modo de operación, velocidad y autonomía, de acuerdo con el tipo de batería. Las baterías de iones de litio son las más utilizadas en los vehículos eléctricos, en los cuales se pueden alcanzar hasta 200 km/h, con autonomías que van de los 120 km y hasta los 390 km, mientras que los híbridos enchufables (HEV) con baterías de NiMH pueden alcanzar velocidades de hasta 170 km/h y autonomías entre los 900 y 1200 km [26, 27].

De acuerdo con [28], la tecnología de almacenamiento de iones de litio tiene la mayor probabilidad de ser la alternativa más económica en los próximos 10 a 30 años.

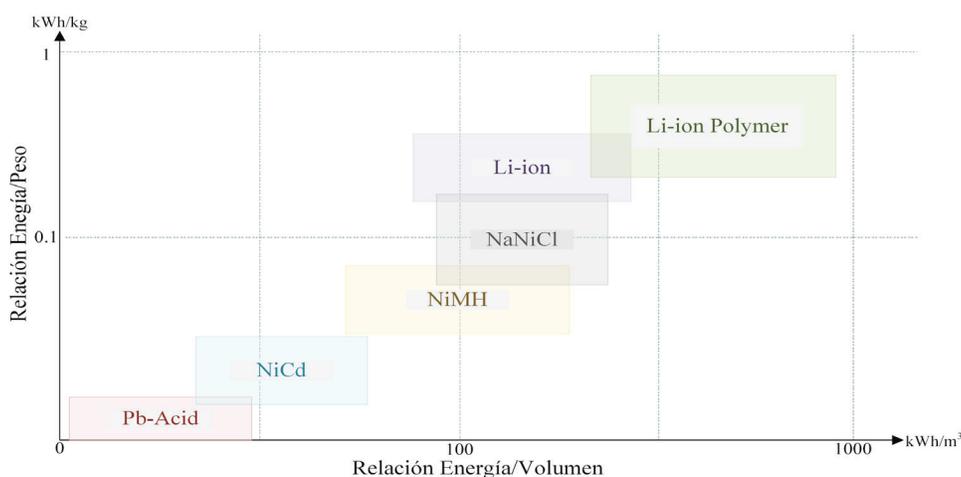


Figura 4: Tecnologías de baterías electroquímicas relacionadas por su densidad de peso/volumen vrs energía basada en [26,27].

Modelado de baterías como una carga en el sistema de potencia

El modelado de las cargas en los modelos de simulación en la región de Centroamérica tradicionalmente ha sido hecho como *cargas estáticas*, no obstante representar matemáticamente el comportamiento de estas, será un reto para conocer las componentes de potencia, corriente o impedancia constante (ZIP, por su acrónimo en inglés) utilizada en el modelado [8]. Dichos modelos deberán responder de manera eficiente ante los cambios en la demanda tanto en potencia activa como reactiva a diversas condiciones de operación del sistema. No obstante, hay que recordar que las cargas dependen directamente de la tensión. El modelo matemático ZIP se analiza con las siguientes ecuaciones:

$$P_0 \left(p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + p_3 \right), \quad (1)$$

donde $p_1 + p_2 + p_3 = 1$

$$Q_0 \left(q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + q_3 \right) \quad (2)$$

donde $q_1 + q_2 + q_3 = 1$

La demanda representada como un modelo *exponencial*, se analiza de la siguiente manera:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (3)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (4)$$

Los valores V_0 es la tensión inicial, las potencias P_0 y Q_0 son las potencias *activas* a una tensión V_0 y *reactiva* a una tensión V_0 . Los parámetros p_1 a p_3 y q_1 a q_3 son los coeficientes del modelo. Los valores son los *exponentes* de la potencia activa y reactiva respectivamente. Dependiendo de cada uno de estos parámetros, las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) se modelará cargas de *impedancia*, *corriente* o *potencia* constante. Los modelos de cargas dinámicos son ampliamente utilizados para el modelado de la recuperación de demanda posterior a las perturbaciones donde hubo afectación de la tensión. Este modelo posee un *exponente* de potencias activa y reactiva para modelar en estado permanente y transitorio.

Consideraciones de la alta penetración de baterías en los sistemas eléctricos de potencia.

El comportamiento de la penetración baterías estacionarias o aquellas utilizadas en VE en cualesquiera de sus condiciones e.g. *carga*, *descarga* o *reposo conectado (stand by)* y el desarrollo de un modelo que se adecua a los anteriores, será un reto para lograr integrar este tipo de cargas a las herramientas de simulación. Por lo tanto, las aplicaciones informáticas de simulación deberán cada vez más adaptarse a dichos requerimientos, pero también los modelos deberán tener datos más certeros y confiables sobre las cargas a modelar, aun así,

quedará a futuro la tarea pendiente de estudiar la interacción en tiempo real la masificación de las baterías en los VEs en las redes eléctricas dado que estos no constituyen una carga tradicional al sistema.

Los modelos de los sistemas de almacenamiento planteados como *corriente constante* pueden provocar inestabilidad en las redes estudiadas mientras que si se hace a *potencia constante* permiten una mayor integración de baterías en VEs en la red; de igual modo sucede con los vehículos híbridos modelados a *corriente constante* [9].

Estos efectos se pueden analizar por medio de software de simulación como los indicados en el cuadro 1 en donde se muestra dos estudios del sistema de potencia aplicados en la investigación incluyendo el software aplicado para su análisis.

Cuadro 1. Resumen de estudios del sistema de potencia aplicados en la investigación.

Estudio	Software de Análisis	Referencia
Cargabilidad	PSS/E, Eurostag, OpenDSS, DigSILENT, MATLAB, RTDS Real-Time Simulator	[9] [22] [10] [16] [19] [117]
Estabilidad	PSS/E, Eurostag, OpenDSS, DigSILENT, MATLAB, RTDS Real-Time Simulator	[22] [13] [10] [21] [18] [24] [23] [14] [12] [19] [12] [15]

Se presenta un reto el establecer un modelo adecuado que pueda simular el comportamiento real de las baterías en vehículos eléctricos (BVE) en los sistemas de potencia. En las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) las investigaciones deberían contemplar el efecto de la cargabilidad en la frecuencia del sistema a fin de determinar las distintas condiciones de penetración de BVEs. Otro aspecto importante es el análisis de los BVEs en presencia de fuentes de energía renovables *intermitentes* como la energía solar, eólica o marina ante una alta penetración de BVEs en condición V2G o G2V. Un desafío para la investigación de la región de Centroamérica será el análisis de la reconfiguración de la red ante grandes perturbaciones como la pérdida de generación o la carga y de esta forma establecer estrategias de control para mitigar sus efectos nocivos e.g. *problemas de cargabilidad, estabilidad, regulación de frecuencia y de tensión entre otros*. El sistema de Dinamarca fue estudiado bajo esta condición, tomando en cuenta la energía eólica y una alta penetración de BVEs [10], asimismo el sistema de potencia Nórdico, no obstante, solamente analizó cargabilidad con una alta penetración de BVEs [11]. Las redes eléctricas centroamericanas deberán considerar escenarios de integración de generación de energía intermitente, almacenamiento y VEs.

Condiciones de Inestabilidades para el Sistema de Potencia

Varias investigaciones se han enfocado en el análisis de *redes de distribución*, sobre todo por el impacto de la cargabilidad vehicular en la inestabilidad tensión y transitoria en condición V2G o G2V. Otros análisis complementarios han sido las pérdidas en las redes eléctricas, perfiles de tensión en barras y sin dejar de lado los estudios económicos y de mercados eléctricos [12]. La estabilidad de tensión es importante tomarla en cuenta, pues debe ser analizada en la condición G2V ya que la tensión depende de la cargabilidad. Por lo tanto, este problema se dará de forma local en las redes eléctricas y será necesario el uso de compensación de potencia reactiva.

Establecer cuotas de BVEs ha sido una manera eficaz de estimar la cargabilidad en las barras del sistema. Un ejemplo sería establecer simulaciones con aumentos definidos a través de tiempo, no obstante, se pueden proponer estimaciones de cálculo más realistas a partir de métodos

matemáticos de predicciones futuras tomando en consideración variables macroeconómicas, de consumo, eléctricas entre otras. Otras redes eléctricas tanto en transmisión como distribución han sido analizadas en presencia de gran cantidad de BVEs pero el análisis se ha enfocado a algunas *redes de prueba* y no a condiciones reales.

Para el caso de Centroamérica será de gran importancia en estudios de estabilidad conocer el comportamiento en estado dinámico de las cargas, por lo que el desarrollo de controladores para lograr mantener la regulación de la frecuencia ha sido tomado en cuenta en otros estudios [13]. La estabilidad *transitoria* puede ser afectada debido a los desbalances de *generación-carga* en el sistema de potencia. Los estudios de estabilidad transitoria se han enfocado en la búsqueda de *controladores* para que con un algoritmo adecuado puedan tomar decisiones en la integración de la carga o generación dependiendo el requerimiento energético del momento e.g. un controlador de grupo de generadores fue propuesto para la mejora de estabilidad y otros diversos controladores han sido desarrollados como opción para el tratamiento de las *cargas* a fin de mejorar la estabilidad transitoria [16][21]. Los controladores son una opción importante para mantener el equilibrio de potencia de la generación y carga ante perturbaciones. A nivel centroamericano se presentan oportunidades de análisis en el parque de generación.

Otros controladores funcionando en conjunto con el control primario de la frecuencia [18], son una opción ante ciclos de carga y descarga masivos. De igual modo, es necesario considerar las fuentes de energía renovable intermitente y las interconexiones que posean los sistemas de potencia. En condición G2V se podría estudiar el efecto de las tecnologías de los elementos de carga de BVEs.

El análisis de estabilidad de *pequeña señal* podría determinar los modos de oscilación para algunas perturbaciones del sistema de potencia. Este tipo de análisis será importante al considerar los diversos ciclos de carga y descarga de los BVEs a lo largo del día [15]. En este aspecto es importante comprender los hábitos de consumo energéticos de la población para con el uso de BVEs pues de esta manera se puede conocer y administrar la energía *demandada* o *entregada* a la red eléctrica. Algunas de las medidas para la administración energética dentro del mercado eléctrico podrían ser el aprovechamiento de la disponibilidad de potencia (*si se tienen BVEs integrados de forma masiva*) a diversas horas del día y de esta manera entregar potencia activa y reactiva al sistema eléctrico y de esta forma minimizar el uso de *combustibles fósiles*. El impacto energético y económico de las medidas deberá ser evaluado ampliamente para buscar alternativas y soluciones en la descarbonización de los países [20].

Por lo tanto, la investigación en una red como la centroamericana con modelos, datos reales y herramientas computacionales poderosas contribuirán a determinar el impacto de la penetración de los BVEs en el sistema de potencia, en condiciones V2G o G2V. De esta manera, proponer y plantear alternativas en estrategias de control para la mejora de las condiciones ante una alta penetración de BVEs en presencia de fuentes renovables intermitentes u otros es una necesidad creciente y de esta forma mitigar sus efectos negativos en el sistema de potencia. El análisis de las redes eléctricas será de gran importancia pues no solo repercutirá a futuro en beneficios potenciales debido a la integración de las nuevas tecnologías para proveer estabilidad y capacidad de penetración sino mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico [29] debido crecimiento de la demanda y los requerimientos energéticos de los clientes eléctricos de la región.

Conclusiones

Centroamérica presenta condiciones óptimas para continuar desarrollado el sistema eléctrico con generación renovables, existe una infraestructura la cual esta desarrollada para continuar integrando alternativas de generación distintas a las existentes. El auge en la generación regional de la energía eólica y solar, implican acciones para robustecer la infraestructura actual para de esta forma mantener las condiciones operativas del sistema de potencia. Se presentan, por lo tanto, un desafío importante en la integración de este tipo de generación renovable intermitente, pues debido a los ciclos de generación que esta pueda tener a lo largo del día, los desbalances en la producción de electricidad pueden afectar el equilibrio generación – carga.

Existe de esta manera una oportunidad para desarrollar un sistema eléctrico capaz de absorber energía con grandes cambios debido a la intermitencia en su producción de electricidad. No obstante, el futuro deparará una gran cantidad de alternativas de generación de electricidad que se irán integrando a las redes eléctricas siempre y cuando los beneficios económicos permitan su aplicación. El desarrollo de estas tecnologías permitirá una creciente y constante innovación en la manera de cómo operar los sistemas de potencia pues habrá que adaptarse a cada una de ellas conforme su presencia sea significativa en la matriz energética de los países.

Por último, cada vez se hará imperante conocer los modelos matemáticos de cada una de las tecnologías a fin de simular su integración en la red y de esta manera poder tomar las mejores decisiones en el planeamiento y expansión de los sistemas de potencia. La planificación de los sistemas eléctricos requerirá de herramientas computacionales que puedan simular de manera poderosa cada una de las tecnologías que se presenten. La masificación en la integración de estas tecnologías supone oportunidades de investigación en armónicos, mercados eléctricos, estabilidad, cargabilidad y entre otros.

Agradecimientos

Se agradece a Vicerrectoría de Investigación y Docencia en ITCR por el apoyo al proyecto “*Modelado de la futura penetración de Vehículos Eléctricos para realizar estudios eléctricos y ambientales para Costa Rica*” código 5402-1341-1801. Así mismo al CENCE-ICE por los datos proporcionados y el apoyo al proyecto de doctorado del autor. Le damos gracias a CFS SISTEMAS S.A (*represente exclusivo de ETAP para Costa Rica*) y ETAP por proveer la licencia de ETAP para apoyar el proyecto de doctorado del autor en la investigación y análisis en este y artículos futuros que se desarrollen.

Referencias

- [1] C. Meza, “A review on the Central America electrical energy scenario”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, p. 566-577, 2014.
- [2] J. Zarnikau, I. Partridge, J. Dinning, D. Robles. “Will the SIEPAC Transmission Project Lead to a Vibrant Electricity Market in Central America?”. *International Association for Energy Economics*, Fourth Quarter 2013.
- [3] D. Gent, and J. Tomei. “Electricity in Central America: Paradigms, reforms and the energy trilemma.” *Progress in Development Studies* 17.2 (2017): 116-130.
- [4] M.E. Rojas Navarrete. “Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA)”, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2018.
- [5] Kleinberg, Michael, et al. “Energy storage valuation under different storage forms and functions in transmission and distribution applications.” *Proceedings of the IEEE* 102.7 (2014): 1073-1083.
- [6] Zach, K. A., and H. Auer. “Bulk energy storage versus transmission grid investments: Bringing flexibility into future electricity systems with high penetration of variable RES-electricity.” 2012 9th International Conference on the European Energy Market. IEEE, 2012.

- [7] Phillips-Brenes, Hayden, Roberto Pereira-Arroyo, and Mauricio Muñoz-Arias. "Energy-based model of a solar-powered pumped-hydro storage system." 2019 IEEE 39th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIX). IEEE, 2019.
- [8] J. Machowski, J. W. Bialek y B. James R., *Power System Dynamics: Stability and Control*, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [9] T. Das y D. C. Aliprantis, «Small-Signal Stability Analysis of Power Systems Integrated with PHEVs» de 2008 IEEE Energy 2030 Conference, 2008.
- [10] J. R. Pillai y B. Bak-Jensen, «Integration of Vehicle-to-Grid in the Western Danish Power System» IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 2, n° 1, pp. 12-19, 2011.
- [11] L. Zhaoxi, W. Qiuwei, N. Arne Hejde y Y. Wang, «Day-ahead Energy Planning with 100\% Electric Vehicle Penetration in the Nordic Region by 2050» Multidisciplinary Digital Publishing Institute (ENERGY), vol. 7, n° 3, pp. 1733--1749, 2014.
- [12] U. C. Chukwu, «Assessment of the Impact of V2G on the Electric Distribution Network» Tennessee Technological University, Tennessee, 2011.
- [13] P. M. P. da Rocha Almeida, «Impact of Vehicle to Grid in the Power System Dynamic Behaviour» Universidade do Porto (Portugal), Porto, 2011.
- [14] D. Wu, K. T. Chau, C. Lui , S. Gao y F. Li, «Transient Stability Analysis of SMES for Smart Grid With Vehicle-to-Grid Operation »,» IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, n° 3, 2012.
- [15] C. H. Dharmakeerthi, N. Mithulanathan y A. Atputharajah, «Development of Dynamic EV Load Model for Power System Oscillatory Stability Studies» de 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2014.
- [16] A. Gajduk, M. Todorovski, J. Kurths y L. Kocarev, «Improving power grid transient stability by plug-in electric vehicles» New Journal of Physics, vol. 16, n° 11, 2014.
- [17] C. Zhang, C. Chen, J. Sun, P. Zheng, X. Lin y Z. Bo, «Impacts of electric vehicles on the transient voltage stability of distribution networks and the study of improvement measures» de Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2014 IEEE PES Asia-Pacific, 2014.
- [18] S. Izadkhasht, P. García-González y P. Frías, «An aggregate model of plug-in electric vehicles for primary frequency control» 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016.
- [19] J. Xiong, K. Zhang, Y. Guo y W. Su, «Investigate the Impacts of PEV Charging Facilities on Integrated Electric Distribution System and Electrified Transportation System» IEEE TRANSACTIONS ON TRANSPORTATION ELECTRIFICATION, vol. 1, n° 2, pp. 178-187, 2015.
- [20] M. S. Khalid, X. Lin, Y. Zhuo, R. Kumar y M. K. Rafique, «Impact of energy management of electric vehicles on transient voltage stability of microgrid,» de International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 2015.
- [21] B. Zhou, T. Littler y L. Meegahapola, «Assessment of transient stability support for electric vehicle integration» de Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016.
- [22] P. Mitra y G. K. Venayagamoorthy, «Wide Area Control for Improving Stability of a Power System with Plug-in Electric Vehicles» IET generation, transmission & distribution, vol. 4, n° 10, pp. 1151-1163, 2010.
- [23] T. N. Pham, H. Trinh, L. V. Hien y K. P. Wong, «Integration of Electric Vehicles for Load Frequency Output Feedback Hoo; control of smart grids» IET Generation, Transmission Distribution, vol. 10, n° 13, pp. 3341-3352, 2016.
- [24] J. A. P. Lopes, F. J. Soares y P. M. R. Almeida, «Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System» Proceedings of the IEEE, vol. 99, n° 1, pp. 168-183, 2011.
- [25] K. Yuan, Y. Song, C. Sun, Z. Xue, Z. Wu, J. Li y B. Yuan, «Harmonic characteristics of distributed generation and electric vehicles integrating to the grid» de IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, 2017.
- [26] A. M. Andwari, A. Pesiridis, S. Rajoo, R. Martinez Botas, and V. Esfahanian, "A review of battery electric vehicle technology and readiness levels," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 414–430, 2017.
- [27] J. Y. Yong, V. K. Ramachandaramurthy, K. M. Tan, and N. Mithulanathan, "A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 365–385, 2015.
- [28] Schmidt, O., Melchior, S., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). Projecting the future levelized cost of electricity storage technologies. *Joule*, 3(1), 81-100.
- [29] Gómez-Ramírez, Gustavo Adolfo. "Evolución y tendencias de índices de confiabilidad en sistemas eléctricos de potencia". *Revista Tecnología en Marcha*, 2016, vol. 29, no 2, p. 3-13.