

Ubicación de paneles solares a la red de distribución de corriente continua de medio voltaje considerando cargas en DC

Location of solar panels to the medium voltage direct current distribution network considering DC loads

Edgar Stalin Pilatasig-Minchala¹ ; Alex David Valenzuela-Santillán²

¹Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. epilatasigm@est.ups.edu.ec

²Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. avalenzuela@ups.edu.ec

Fecha de recepción: 1 de marzo de 2021. Fecha de aprobación: 12 de mayo de 2021

Resumen- La penetración de energías renovable de corriente continua (DC) a la red de distribución de corriente continua de medio voltaje (MVDC) ya es una realidad. Por lo que, se requiere de una amplia planificación para su ubicación en la red eléctrica. La implementación de esta energía trae grandes ventajas al sistema, ya que contribuye a la reducción de pérdidas, mejoramiento del perfil de voltaje, mayor confiabilidad en el sistema, ya que se tiene generación del sistema fotovoltaico instalado y de la empresa distribuidora. El presente artículo se hizo a través de una revisión bibliográfica de las bases IEEE Xplore, Science Direct, Taylor & Francis y conocimientos académicos relacionados, llegando a identificar varios aspectos positivos y negativos de esta nueva realidad de la energía renovable, de igual forma se analizó el sistema de almacenamiento de energía (BESS) y el impacto de los vehículos eléctricos (EV) en las redes de distribución.

Palabras clave- Bess; energía renovable; estado del arte; MVDC; vehículos eléctricos.

Abstract- The penetration of renewable energies of Direct Current (DC) to the Distribution Network of Direct Current of Medium Voltage (MVDC) is already a reality. Therefore, extensive planning is required for its location in the electrical network. The implementation of this energy brings great advantages to the system since it contributes to the reduction of losses, improvement of the voltage profile, greater reliability in the system since there is generation of the photovoltaic system installed and of the distribution company. This article was carried

out through a bibliographic review of the bases IEEE Xplore, Science Direct, Taylor & Francis and related academic knowledge, identifying several positive and negative aspects of this new reality of renewable energy, in the same way it was analyzed the Energy Storage System (BESS) and the impact of Electric Vehicles (EV) on distribution networks.

Keywords- Bess; renewable energy; state of the art; MVDC; electric vehicles.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de sostenibilidad energética y ambiental ha alentado el uso de energías renovables para atenuar las emisiones de gases de efecto invernadero, cumpliendo así con el acuerdo climático de París [1]. Sin embargo, se requiere de una planificación adecuada para la inserción de energía renovable a las redes de distribución, cumpliendo satisfactoriamente con los criterios tecnoeconómicos para el correcto funcionamiento de una red de distribución, logrando así la mejora de la estabilidad de voltaje, aumento del perfil de voltaje y reducción de pérdidas [1]. Este objetivo se lo puede lograr únicamente con una correcta planificación y gestionando los desafíos técnicos que conlleva esta implementación de generación de corriente continua en las redes de distribución. Los diseños y configuraciones óptimos son trascendentales a la hora de implantar nuevas tecnologías de energías renovables en el sistema eléctrico [1]. Con el desarrollo de nuevas tecnologías para redes de alta y baja tensión, se están haciendo pruebas con el uso

Citar este artículo como: E.S. Pilatasig-Minchala, A.D. Valenzuela-Santillán, Ubicación de paneles solares a la red de distribución de corriente continua de medio voltaje considerando cargas en DC. *ITECKNE*, 18 (2), 2021 pp. 132 - 140 DOI: <https://doi.org/10.15332/iteckne.v18i2.2563>

de corriente continua en redes de media tensión (MT), ya que proporcionan flexibilidad y controlabilidad a las redes de distribución [2]. Muchos estudios han demostrado que el enlace MVDC puede aumentar significativamente la capacidad de alojamiento de generadores distribuidos hasta un 15% en las redes de distribución y la reducción de un 50% de las pérdidas de energía en comparación con una línea de corriente alternativa convencional [2]. En la actualidad los vehículos eléctricos están teniendo mayor protagonismo, pero la implementación de los mismos traerá grandes problemas a las redes de distribución, ya que se necesitará de centros de cargas rápidas, sistemas almacenamiento de energía, los cuales producirán una gran contaminación de armónicos al sistema y la reducción del factor de potencia general [3].

En el desarrollo del presente artículo se analizan los beneficios y consecuencias de la penetración de energía renovable en DC en las redes de distribución de media tensión MVDC. Además, de vehículos eléctricos y almacenamiento de energía BESS, de esta forma se brinda una base para estudios de la problemática abordada desde una perspectiva técnica.

2. SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DC

Hoy en día, gracias al avance de la tecnología y el crecimiento de cargas en corriente continua, es necesario realizar un análisis de las ventajas de los sistemas DC y de las redes MVDC en los sistemas de distribución.

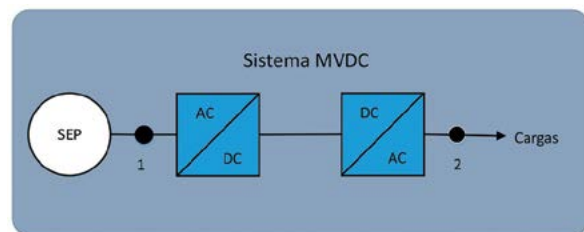
2.1 Red de distribución de corriente continua de medio voltaje (MVDC)

Bathurst y Hwang [4] mencionan que las redes DC en los sistemas de distribución tienen grandes ventajas, es decir, gran escalabilidad, buen control, versatilidad, facilita la entrada a nuevas tecnologías y la reducción en el cableado. Además, Bathurst y Hwang destacan que la transición de MVAC a MVDC nos permitirá aumentar el flujo de carga hasta un 185%. Adicional, estos autores destacan que las redes de distribución MVDC pueden llegar a ser la solución al problema de desequilibrio de corriente. Cabe mencionar que este sistema tiene grandes ventajas que aportarían a la red de distribución, por ejemplo, la reutilización de las líneas existentes en AC. Finalmente, las pérdidas de potencia en una red DC son menores en comparación con una red AC.

El estudio [5] determinó que MVDC puede aportar flexibilidad en una red de distribución, desacoplando los flujos de potencia activa y reactiva a través del enlace, en condiciones normales de funcionamiento. Al ocurrir una avería, la corriente inyectada desde el convertidor podría interferir en la detección y eliminación de las averías del sistema de AC en las redes de distribución. El rendimiento de un MVDC en una red de distribución de 33 Kv se analiza en [6]. Donde se descubrió que el uso de un enlace MVDC aumenta la capacidad de acogida de generación distribuida (GD) en la red de media tensión, pero que las pérdidas que se producen en la red dependen de las condiciones de carga,

generación y de sus estrategias de control. Adicional, el sistema de puesta a tierra más utilizado en las instalaciones de MVAC es el de neutro aislado, mientras que, para las instalaciones DC se dispone de varias soluciones, según el nivel de seguridad y continuidad requerido. En [7] se mencionan las topologías para una red MVDC, tales como: Tipo radial, la cual es muy económica pero muy poco confiable y se conectan las cargas en estrella a una fuente. Tipo anillo de fuente, en la cual se conectan fuentes generadoras en serie y cargas radiales con un solo juego de cables. Tipo rejilla de malla, existe la conexión de múltiples cables a los nodos de la topología tipo anillo, obteniendo así una conexión mallada con alta confiabilidad y flexibilidad en el sistema, pero esta topología incurre en costos muy elevados. Una vez analizadas las topologías, Schael y Sourkounis [8] describen las problemáticas asociadas a redes MVDC, donde mencionan que los problemas que deben ser tomados en cuenta es la vida útil de los equipos MVDC, que varían entre los 15 a 25 años, en cambio los equipos para AC su vida útil varía desde los 30 a 40 años. También se menciona que los armónicos que se pueden producir por las múltiples rectificaciones eléctricas son un problema. De igual forma, un aspecto que se debe considerar es que la mayor parte de los armónicos que se encuentran en el neutro eléctrico se deben a la tercera armónica. Por esta razón Schael y Sourkounis mencionan que la corriente en el neutro es mayor a la de fase, aunque las cargas estén correctamente balanceadas; la corriente en el neutro será la suma de las tres corrientes de las fases de un sistema trifásico de cuatro hilos, ya que si el sistema es balanceado su corriente debe ser cero. Adicional, se menciona para que una red MVDC no genere problemas al sistema eléctrico aguas atrás no debe tener problemas en frecuencia y tensión. Cabe destacar que, lo más grave que puede ocurrir a la calidad de un sistema eléctrico que incluya MVDC es la rectificación, la cual produce altos grados de distorsión armónica, por lo que es necesario el uso de filtros. En la Fig. 1 se representan los puntos de referencia para no tener afectación en la calidad por parte de los sistemas MVDC.

Fig. 1. PUNTOS DE REFERENCIA PARA SALVAGUARDAR LA CALIDAD



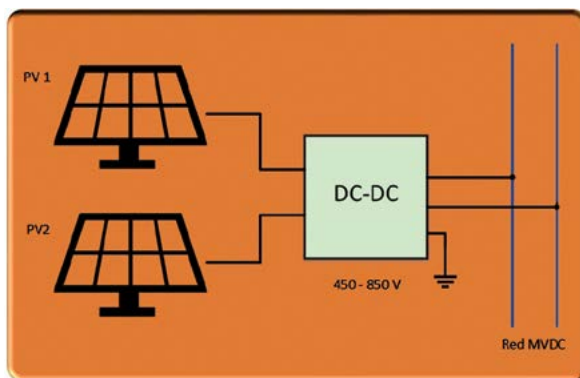
Fuente: Tomado de [8].

En las redes de distribución de media tensión es necesario la implementación de un convertidor de DC/DC para acumular la energía generada por los paneles solares [9]. En particular, el uso necesario de un convertidor de alta elevación es evidente, ya que los módulos fotovoltaicos comerciales están diseñados para soportar hasta 1kV [9]. En [10] se analizan las topologías principales del convertidor

en cascada multipuerto para la red de MVDC de un sistema fotovoltaico. Cabe destacar que, el sistema de transmisión DC tiene menor pérdidas y mayor capacidad que el sistema de Corriente Alterna (AC), aunque la inversión para la implementación de una estación convertidora DC es mucho más alto que un sistema de transmisión de corriente alterna, las ventajas del sistema DC son superiores al sistema AC cuando las distancias de transmisión son significativas [11]. La función de los convertidores en el sistema eléctrico de corriente continua es conectar y transmitir energía entre diferentes niveles de voltaje DC, al igual que los transformadores en el sistema de corriente alterna [11].

Islam y Omole [12] manifiestan en sus investigaciones que, para la inserción de energía fotovoltaica a gran escala en una red de distribución se requiere de una amplia planificación y de su ubicación en la red eléctrica, ya que necesita de un espacio, acceso, mantenimiento y una gran exposición a la radiación solar. En la Fig. 2 se muestra la integración de un MVDC con generación fotovoltaica con un convertidor DC/DC multipuerto.

Fig. 2. GENERACIÓN FOTOVOLTAICA EN UNA RED MVDC



Fuente: Tomado de [12].

En muchos artículos científicos de alto impacto se estudia el manejo de las fallas en DC, para diseñar y operar sistemas MVDC, ya que el costo de los interruptores de alta velocidad en corriente continua sigue siendo un desafío [13]. Huang y Qi [13] plantean la necesidad del estudio y análisis de las fallas en DC para operar sistemas MVDC por lo que promueven el uso de un convertidor modular multinivel (MMC) híbrido, siendo esta una solución rentable para la red de distribución de corriente continua de medio voltaje. Cuando sucede una falla en el sistema eléctrico DC, las corrientes de falla pueden ser contribuidas por: fuentes de AC, DC y elementos de almacenamiento de energía como condensadores e inductores [14]. Los disyuntores de AC son dispositivos que pueden interrumpir las contribuciones de energía de las fuentes de AC, pero las contribuciones de falla de las fuentes de corriente continua no pueden ser interrumpidas por los disyuntores AC. Además, los disyuntores AC son dispositivos de respuesta muy lentos, tardan varios milisegundos en interrumpir las fallas de las fuentes de AC [15]. Si la apertura de los disyuntores AC es lenta, las corrientes

de falla DC pueden aumentar a niveles altos, causando daños a los dispositivos electrónicos de alimentación, para solucionar este problema en los últimos años se ha propuesto la inserción de disyuntores DC de alta velocidad para la protección de la red de distribución DC [15].

En [16], [17] se mencionan las aplicaciones potenciales futuras de sistemas MVDC, ya sean en algunas embarcaciones marítimas, generación eólica offshore con interconexión submarinas, ferrocarriles de tracción eléctrica. Sin embargo, las aplicaciones pueden expandirse a:

- Interconexión con todo tipo de generación eléctrica offshore
- Microrredes con integración de energía a pequeña y gran escala
- Distribución eléctrica
- Transporte
- Electrificación en plataformas petroleras, mineras y gas

La entrada de sistemas MVDC al sistema eléctrico contribuye a la robustez del sistema de distribución. También contribuye a la mejora de la eficiencia operativa y de control que es a donde apuntan llegar las empresas distribuidoras de energía [17].

3. GENERACIÓN DISTRIBUIDA

En esta sección se menciona el principio de funcionamiento y composición de una planta fotovoltaica y la correcta ubicación en la red de distribución de corriente continua.

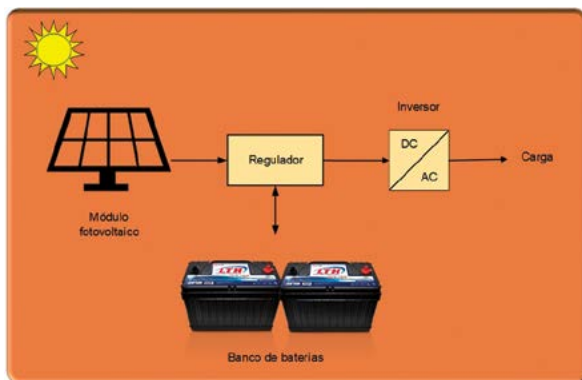
3.1 Generación fotovoltaica

El proceso de generación de energía se describe mediante la recepción de radiación solar en los módulos fotovoltaicos, luego la energía es transportada hacia el regulador, el cual tiene la función de nivelar el voltaje para los procesos posteriores, el almacenamiento de la energía se realiza en el banco de batería, hecho esto, la energía eléctrica en DC se transporta hacia el inversor, el cual, mediante la utilización de electrónica de potencia, convierte la energía DC en energía AC [15]. La Fig. 3 muestra la estructura y elementos de un sistema fotovoltaico que permite generar energía eléctrica.

En la actualidad la generación de energía solar fotovoltaica (FV) está aumentando a pasos acelerados en el sector de la energía eléctrica mundial [15]. Esto se debe a la reducción en el costo de los paneles solares, avance en la electrónica de potencia y la mejora en su eficiencia. La instalación de paneles solares a pequeña escala en los tejados de las viviendas está en crecimiento, debido a los beneficios económicos que puede tener el usuario [15]. Como limitante podemos mencionar que, el hecho de realizar un estudio, el cual nos garantice que la ubicación sea la óptima dentro de un sistema eléctrico, no asegura que dicha

ubicación sea también la óptima para producir energía eléctrica de tipo fotovoltaica, debido a la radiación solar y la orientación de los paneles solares. En [18] se analiza la forma correcta de orientación de los módulos solares para percibir mayor radiación solar. Para ello se necesita de estudios de energía primaria para conocer el comportamiento del sol en una ubicación determinada. Si estos estudios no son realizados, se tendrá como resultado una producción fluctuante de energía, provocando un aporte de energía fluctuante para el sistema de distribución, desencadenando así, contingencias eléctricas, tales como variaciones de tensión y variaciones de frecuencia [19], [20]. De manera que, el sistema de distribución eléctrica es el que conecta a la empresa distribuidora con el usuario final, es necesario mencionar que, estos dos actores obtienen beneficios al existir generación distribuida en el sistema eléctrico, ya que al incrementar unidades de generación renovable las interrupciones eléctricas se ven disminuidas y el costo de la energía también se verá reducido. Esto se debe a que se evitará suministrar energía proveniente de centrales convencionales con costos de producción elevados [21], [22].

Fig. 3. COMPOSICIÓN DE UNA PLANTA FOTOVOLTAICA



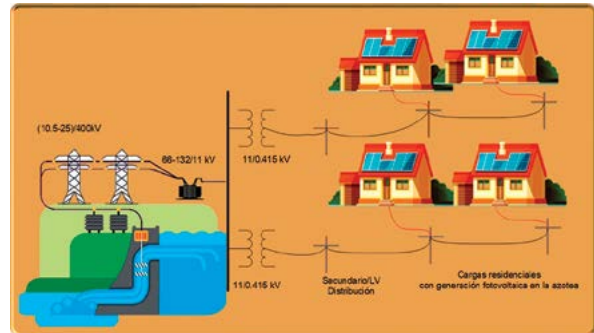
Fuente: Tomado de [15].

Zafoschnig y Nold [23] señalan que el costo de generación de energía solar es menor si comparamos con las fuentes de generación convencionales, para lograr disminuir aún más los costos de generación solar Zafoschnig y Nold enfatizan que se requiere de un correcto estudio y planificación en la instalación, logrando así una optimización en los recursos. Por lo tanto, la generación de energía debe ser exactamente igual a la demanda [23], [24]. Además, se debe tomar en consideración que la mayor energía solar es percibida al medio día debido a la alta radiación solar, ya que existe menor atmósfera que atravesar [25]. En la Fig. 4 se representa la generación fotovoltaica en las azoteas de los hogares y la conexión a la red de distribución.

El fortalecimiento del sistema eléctrico es importante, esto se debe a que, al sumar generadores al sistema, las contingencias que pueden presentarse serán amortiguadas de mejor manera, debido a que la regulación primaria de frecuencia indica que, a medida que el sistema eléctrico sea más robusto, este podrá amortiguar de mejor manera

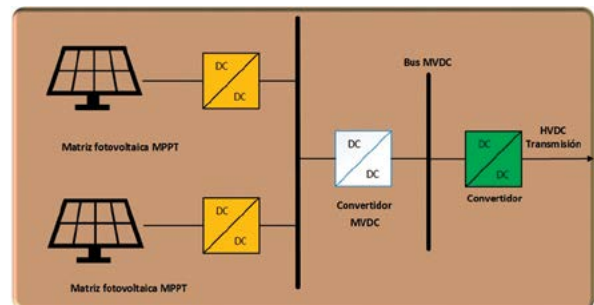
las contingencias, ya que las características operacionales de los generadores pueden sobreponerse a estos eventos utilizando un porcentaje de su reserva de generación [26]. En la Fig. 5 se representa la conexión parques fotovoltaicos a una red MVDC.

Fig. 4. GENERACIÓN FOTOVOLTAICA EN LAS AZOTEAS DE LOS HOGARES CON CONEXIÓN A LA RED DE DISTRIBUCIÓN



Fuente: Tomado de [25].

Fig. 5. MVDC PARA PARQUES FOTOVOLTAICOS



Fuente: Tomado de [26].

3.2 Ubicación de sistemas fotovoltaicos en la red de distribución de corriente continua de medio voltaje

Para la ubicación correcta de sistemas fotovoltaicos a la red de distribución, primero se debe realizar un análisis del funcionamiento del sistema por medio del método de flujos de potencia, este método nos permite encontrar los valores, tales como: corriente, voltaje, ángulo de voltaje y valores de potencia activa en cada barra o bus del sistema, dándonos una idea del funcionamiento en operación normal del sistema. Los valores de las variables obtenidas luego de analizar el flujo de potencia en un *software* especializado no definen si dichos valores se encuentran en un rango óptimo. Por ello es necesario implementar el método conocido como flujo óptimo de potencia, el cual nos permite identificar si los valores de las variables son los adecuados. Hecho esto, se ve la necesidad de ejecutar el algoritmo de búsqueda armónica, mediante el cual se elige aleatoriamente una barra o bus del sistema, para implementar en él un sistema fotovoltaico a modo de generación distribui-

da para compensar si su funcionamiento no es el óptimo, luego de esto, el resultado obtenido debe ser archivado en la memoria armónica para posteriormente analizar si es o no la barra adecuada, este proceso se debe repetir para las n barras que componen el sistema [27], [28], [29].

Cabe destacar que, cada estudio que se haga de la ubicación de sistemas fotovoltaicos en las distintas barras del sistema, tendrán como finalidad el hallar la ubicación óptima en la que se deba implementar el sistema de generación, considerando el mejor y mayor impacto dentro del sistema, ya que el compensar en la barra o bus que contenga los peores valores luego de correr el flujo de potencia no asegura que el sistema obtenga los mejores resultados.

El sitio donde MVDC puede proporcionar beneficios para la implementación es [30]:

- Líneas aéreas largas
- Circuitos de cables urbanos
- Áreas sensibles o altamente restringidas
- Ángulos de fase a través de las entradas de transmisión
- Sistemas de media tensión con desafíos de voltaje y flujo de energía

4. NUEVAS TENDENCIAS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO

A continuación, se presenta un análisis del impacto de los vehículos eléctricos en las redes MVDC, estaciones de carga rápida, sistemas de almacenamiento de energía por batería. Además, de sistemas de almacenamiento de energía para sistemas fotovoltaicos, hogares y edificaciones inteligentes.

4.1 Vehículos eléctricos

En los vehículos de la actualidad por más de un siglo su fuente principal de energía han sido los combustibles fósiles. Hoy en día los vehículos eléctricos están teniendo mayor protagonismo, ya que existe una innovación en el diseño, con el fin de reducir los agentes contaminantes para el ambiente, así como también evitar totalmente la participación del motor de combustión interna como fuente de energía. Un vehículo eléctrico consta de tracción eléctrica, la cual está compuesta de los siguientes componentes: Máquina eléctrica, funciona normalmente como motor a excepción en el frenado y las pendientes negativas, donde funcionará como generador, devolviendo energía eléctrica a las baterías [31]. Convertidor electrónico, es el dispositivo encargado de convertir la energía eléctrica en DC, proveniente de las baterías este dispositivo tiene la gran ventaja de ser reversible, es decir, entrega potencia al motor cuando el conductor acelera [32]. Sistema de control de tracción, está basado en una plataforma de tipo microprocesador, Programmable Logic Controller (PLC) o Digital Signal Processor (DSP), donde se ejecutan todas las operaciones que

afectan a la tracción del vehículo eléctrico [33]. Sistema de gestión y almacenamiento de la energía, la batería es el dispositivo donde se almacena la potencia necesaria para la propulsión del vehículo. Hoy en día es la tecnología que más problemas ocasiona y está aplacando el desarrollo de los vehículos eléctricos a nivel mundial. Aunque existe un desarrollo en los tipos de baterías ya sea estos de (Litio, NiCd, Pb, etc) siendo la batería de ion Litio la más prometedora debido a sus características, permitiendo una recarga mucho más rápida [34].

En [35] y [36] se analiza el sistema de almacenamiento de energía de un vehículo eléctrico, el cual está compuesto por un conjunto de celdas de baterías asociadas en serie y en paralelo. Los vehículos de alta potencia tienen un sistema de almacenamiento híbrido que utilizan supercondensadores, una tecnología con muchas ventajas que no ofrecen las baterías. Raheemihaja y Zhang [37] enfatizan que con el objeto de brindar seguridad y estabilidad mecánica al vehículo el paquete de baterías debe ser colocado en la parte inferior del mismo. En la Tabla I se muestra los tipos de combustibles y sus respectivas densidades.

Tabla I.
TIPOS DE COMBUSTIBLES Y DENSIDAD DE ENERGÍA

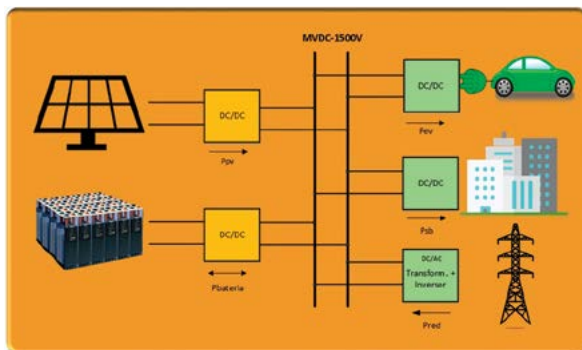
Combustible	Energía por volumen (Wh/l)	Energía por masa (Wh/kg)
Gasóleo	10.700	12.700
Gasolina	9.700	12.200
Grasa corporal	9.700	10.500
Carbón	9.400	6.600
Butano	7.800	13.600
Gas natural (250 bares)	3.100	12.100
Hidrógeno líquido	2.600	39.000
Batería litio cobalto	330	150
Batería litio manganeso	280	120
Batería plomo ácido	64	40

Fuente: Tomado de [37].

Otro aspecto importante en los vehículos eléctricos es investigado por los autores Zhou y Zhang [38], quienes mencionan que las estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos en la actualidad están compuestas por un sistema fotovoltaico, baterías de iones de litio para el almacenamiento de energía, una conexión a la red de distribución y dos unidades de carga rápida para vehículos eléctricos de 48 kW. Sin embargo, los impactos de las estaciones de carga rápida en las redes de distribución provocarían (fluctuaciones de voltaje, cortes de tensión y armónicos). El impacto de las estaciones de carga rápida en las redes de distribución en términos de caídas de voltaje y el control de potencia reactiva (Q) se evidencia en [39]. Para llegar a ser competitivo con los vehículos con motor de combustión interna, los tiempos de carga de los vehículos eléctricos deben ser los más cortos posible. Así, queda entendido

que para la inserción de vehículos eléctricos es necesario un óptimo desarrollo de FCS comerciales y de la implementación de varios puntos de carga de alta potencia [39]. En [3] se plantea un innovador sistema de gestión energética descentralizado (EMS) para controlar las fuentes de energía de la estación de carga rápida, este control se probó cuando varios vehículos eléctricos estaban conectados a la red y bajo diferentes condiciones de irradiación. En [36] lograron simular la carga rápida de dos vehículos eléctricos para demostrar que el número de cargadores pueden producir contaminación armónica, específicamente del orden 11 y 13 que exceden los límites estándar IEEE 519. En la Fig. 6 se muestra la conexión de vehículos eléctricos a la red de distribución MVDC.

Fig. 6. CONEXIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS A LA RED DE MVDC



Fuente: Tomado de [40].

4.2 Sistemas de almacenamiento de energía para sistemas fotovoltaicos

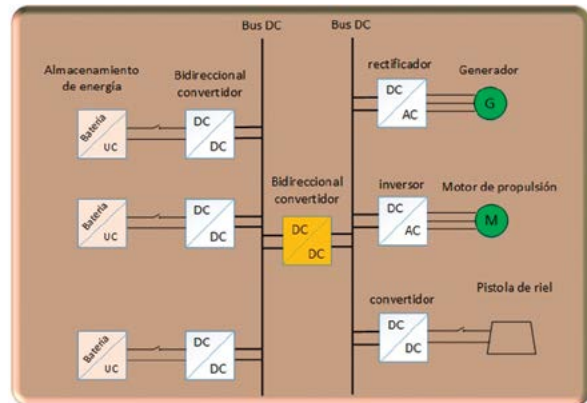
Hoy en día los sistemas de almacenamiento de energía por batería (BESS) se utilizan ampliamente en el mercado energético [41]. Un BESS es un dispositivo electroquímico que tiene como objetivo principal convertir la energía eléctrica en energía química o viceversa, las baterías almacenan la energía excedente que se produce a medio día y no es utilizada por el sistema de distribución [41]. Un sistema de almacenamiento de energía puede generar altas ganancias si el mercado eléctrico está dominado por generación de energía renovable [42].

Yoon y Park [43] indican que un BESS está conformado por: un banco de baterías, un sistema de control y un sistema de acondicionamiento de la energía. Donde el banco de baterías está conformado por varias baterías, cada una de estas tienen múltiples celdas conectadas en paralelo o en serie para proporcionar el nivel de voltaje necesario. Las celdas están formadas de dos electrodos, el primer electrodo es negativo (ánodo) mientras que el segundo es positivo (cátodo). Además, existen muchos tipos de baterías, ya sean según la forma del electrodo y del material del electrolito cada una para diferentes aplicaciones.

En [44] plantean una técnica para situar instalaciones de almacenamiento de energía y cambiadores de tomas

con la finalidad de reducir problemas técnicos de distribución y costos. Li y Wang [45] desarrollaron un modelo para una red de distribución con alta penetración de recursos renovables y sistemas de almacenamiento de energía con el objetivo de planificar la expansión de una red de distribución. En la Fig. 7 se representa un sistema híbrido de almacenamiento de energía mediante baterías.

Fig. 7. SISTEMA DE ALMACENAMIENTO HÍBRIDO DE ENERGÍA



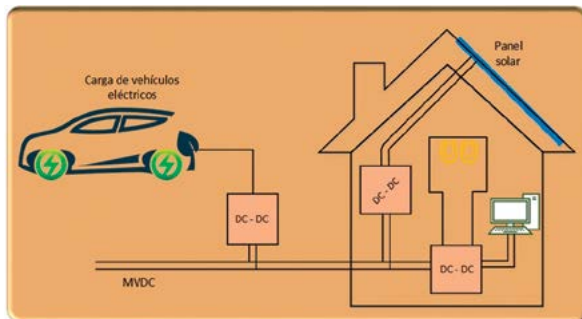
Fuente: Tomado de [45].

4.3 Hogares y edificaciones inteligentes

Hoy en día los sistemas fotovoltaicos están teniendo un gran protagonismo gracias al avance de la tecnología y de la electrónica de potencia. Cabe destacar que en la actualidad la mayoría de cargas son DC, ya sean en los hogares o edificaciones, por esta razón se ve la necesidad de tener redes de corriente continua, ya que en esta investigación se han citado los grandes beneficios que esta aportaría al sistema eléctrico. Su y Lie [46] mencionan que al tener redes de corriente continua y cargar un vehículo eléctrico es casi equivalente a agregar dos casas a la red de distribución. A partir de esto se debe analizar lo que podría ocurrir cuando todos los propietarios de vehículos eléctricos decidan recargarlos después de regresar del trabajo, tomando en cuenta que a esa misma hora en los hogares se enciende la calefacción, los hornos y otros electrodomésticos de gran consumo de energía. El riesgo de sobrecargar los transformadores de distribución o alimentadores es alto en períodos específicos del día. Además, Su y Lie concluyen que la generación fotovoltaica normalmente alcanza su punto máximo de generación al mediodía, cuando la demanda de carga de vehículos eléctricos es relativamente baja. Lo que conlleva un desequilibrio energético dinámico entre la generación fotovoltaica y la demanda en la carga de los vehículos eléctricos. Los autores en [47] proponen que los propietarios de vehículos eléctricos cambien sus comportamientos de carga, por lo que es necesario dar incentivos por parte de las distribuidoras de electricidad, proporcionando varias tarifas de precios, para así poder aplanar la curva de potencia. Cuando se trata de la inserción de vehículos eléctricos y paneles fotovoltaicos a las redes de distribución, la programación en *software* no siempre puede

lograr la eficacia esperada, ya que no refleja con precisión la voluntad de los propietarios de vehículos eléctricos para acogerse a los planes de incentivos de las distribuidoras de electricidad [47]. La Fig. 8 muestra un ejemplo de hogar en corriente continua, con carga para vehículos eléctricos, módulos fotovoltaicos, cargas de corriente continua.

Fig. 8. FUNCIONAMIENTO DE UN HOGAR CON CORRIENTE CONTINUA



Fuente: Tomado de [47].

5. CONCLUSIÓN

La variación de la demanda de energía eléctrica a causa de los vehículos eléctricos y edificaciones inteligentes, es un elemento clave para la penetración de energía renovable a los sistemas de distribución MVDC, logrando así el mejoramiento y confiabilidad del sistema por las grandes ventajas que tiene la energía renovable. Sin embargo, a pesar de sus ventajas existe un grave problema con la disminución del factor de potencia general y de la corriente, esto sucede al momento de añadir paneles solares a la red de distribución. Para atenuar este problema es necesario de una compensación simultánea de potencia activa (P) y potencia reactiva (Q) en diferentes barras del sistema que lo amerite. El estudio de la demanda de energía eléctrica por tanto es primordial para la planificación de estaciones de carga rápida para EV, sistemas de almacenamiento de energía y de factores asociados a la respuesta de demanda. Existe una permanente innovación en sistemas MVDC lo cual podría resultar beneficioso ya que es el futuro de las redes eléctricas.

6. REFERENCIAS

- [1] M. Ahmadi, O. Bode, M. Sayed, S. Danish, and P. Mandal, "Electrical Power and Energy Systems Optimum coordination of centralized and distributed renewable power generation incorporating battery storage system into the electric distribution network," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 125, no. December 2019, pp. 1–16, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106458>
- [2] Q. Qi, C. Long, J. Wu, and J. Yu, "Impacts of a medium voltage direct current link on the performance of electrical distribution networks," *Appl. Energy*, vol. 230, no. February, pp. 175–188, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.077>
- [3] P. García-Triviño, J. P. Torreglosa, L. M. Fernández-Ramírez, and F. Jurado, "Control and operation of power sources in a medium-voltage direct-current microgrid for an electric vehicle fast charging station with a photovoltaic and a battery energy storage system," *Energy*, vol. 115, pp. 38–48, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.099>
- [4] S. Xiong and S. C. Tan, "Cascaded high-voltage-gain bidirectional switched-capacitor DC-DC converters for distributed energy resources applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 2, pp. 1220–1231, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2552380>
- [5] Y. Zhuang, F. Liu, Y. Huang, X. Zhang, and X. Zha, "A Voltage-Balancer-Based Cascaded DC-DC Converter with a Novel Power Feedforward Control for the Medium-Voltage DC Grid Interface of Photovoltaic Systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 178094–178107, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959040>
- [6] Y. Che, W. Li, X. Li, J. Zhou, S. Li, and X. Xi, "An improved coordinated control strategy for PV system integration with VSC-MVDC technology," *Energies*, vol. 10, no. 10, 2017, DOI: <https://doi.org/10.3390/en10101670>
- [7] M. Islam, A. Omole, A. Islam, and A. Domijan, "Asynchronous interconnection of large-scale photovoltaic plants: Site selection considerations," *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 33, no. 2, pp. 273–283, 2014, DOI: <https://doi.org/10.1080/14786451.2012.697464>
- [8] X. Li, M. Zhu, M. Su, J. Ma, Y. Li, and X. Cai, "Input-Independent and Output-Series Connected Modular DC-DC Converter with Intermodule Power Balancing Units for MVdc Integration of Distributed PV," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 2, pp. 1622–1636, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2924043>
- [9] S. Xiong and S. C. Tan, "Cascaded high-voltage-gain bidirectional switched-capacitor DC-DC converters for distributed energy resources applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 2, pp. 1220–1231, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2552380>
- [10] Y. Zhuang, F. Liu, Y. Huang, X. Zhang, and X. Zha, "A Voltage-Balancer-Based Cascaded DC-DC Converter with a Novel Power Feedforward Control for the Medium-Voltage DC Grid Interface of Photovoltaic Systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 178094–178107, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959040>
- [11] Y. Che, W. Li, X. Li, J. Zhou, S. Li, and X. Xi, "An improved coordinated control strategy for PV system integration with VSC-MVDC technology," *Energies*, vol. 10, no. 10, 2017, DOI: <https://doi.org/10.3390/en10101670>
- [12] M. Islam, A. Omole, A. Islam, and A. Domijan, "Asynchronous interconnection of large-scale photovoltaic plants: Site selection considerations," *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 33, no. 2, pp. 273–283, 2014, DOI: <https://doi.org/10.1080/14786451.2012.697464>
- [13] X. Huang, L. Qi, and J. Pan, "A New Protection Scheme for MMC-Based MVdc Distribution Systems with Complete Converter Fault Current Handling Capability," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 5, pp. 4515–4523, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2917360>
- [14] L. L. Qi, A. Antoniazzi, L. Raciti, and D. Leoni, "Design of Solid-State Circuit Breaker-Based Protection for DC Shipboard Power Systems," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 5, no. 1, pp. 260–268, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2016.2633223>
- [15] Z. Wu, Y. Hu, J. X. Wen, F. Zhou, and X. Ye, "A Review for Solar Panel Fire Accident Prevention in Large-Scale PV

- Applications," *IEEE Access*, vol. 8, no. i, pp. 132466–132480, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010212>
- [16] J. Zhang, M. Cui, H. Fang, and Y. He, "Two Novel Load Balancing Platforms Using Common DC Buses," vol. 3029, no. c, pp. 1–9, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2769471>
- [17] H. Chin, "A Current Index Based Load Balance Technique for Distribution Systems," 1998.
- [18] R. Ben Mansour, M. A. M. Khan, F. A. Alsulaiman, and R. Ben Mansour, "Optimizing the solar PV tilt angle to maximize the power output: A case study for Saudi Arabia," *IEEE Access*, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3052933>
- [19] J. Driesen and R. Belmans, "Distributed Generation: Challenges and Possible Solutions," pp. 1–8, 2006.
- [20] A. T. Davda and B. R. Parekh, "System Impact Analysis of Renewable Distributed Generation on an Existing Radial Distribution Network," pp. 128–132, 2012.
- [21] Z. Bradáč, F. Zezulka, P. Marcoň, Z. Szabó, and K. Stibor, "Stabilisation of low voltage distribution networks with renewable energy sources," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 12, no. PART 1, pp. 455–460, 2013.
- [22] A. Ulbig and G. Andersson, "Analyzing operational flexibility of electric power systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 72, pp. 155–164, 2015.
- [23] L. A. Zafoschnig, S. Nold, and J. C. Goldschmidt, "The Race for Lowest Costs of Electricity Production: Techno-Economic Analysis of Silicon, Perovskite and Tandem Solar Cells," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 10, no. 6, pp. 1632–1641, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3024739>
- [24] P. K. Sahu and M. D. Manjrekar, "Controller design and implementation of solar panel companion inverters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 2, pp. 2001–2011, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2965867>
- [25] B. Jasim and P. Taheri, "An Origami-Based Portable Solar Panel System," *2018 IEEE 9th Annu. Inf. Technol. Electron. Mob. Commun. Conf. IEMCON 2018*, no. 1, pp. 199–203, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2018.8614997>
- [26] S. Seme, N. Lukač, B. Štumberger, and M. Hadžiselimović, "Power quality experimental analysis of gridconnected photovoltaic systems 18 in urban distribution networks," *Energy*, vol. 139, pp. 1261–1266, 2017.
- [27] E. A. Portilla-Flores et al., "Enhancing the Harmony Search Algorithm Performance on Constrained Numerical Optimization," *IEEE Access*, vol. 3536, no. c, pp. 1–21, 2017.
- [28] C. Cobos, J. Pérez, and D. Estupiñan, "Una revisión de la búsqueda armónica A survey of harmony search," vol. 8, no. 2, pp. 1–14, 2011.
- [29] E. Cuevas and N. OrtegaSánchez, "El algoritmo de búsqueda armónica y sus usos en el procesamiento digital de imágenes," *Comput. y Sist.*, vol. 17, no. 4, pp. 543–560, 2013.
- [30] G. Bathurst, G. Hwang, and L. Tejjwani, "MVDC-the new technology for distribution networks," *IET Semin. Dig.*, vol. 2015, no. CP654, pp. 1–5, 2015, DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2015.0037>
- [31] H. Yang, H. Lin, and Z. Q. Zhu, "Recent advances in variable flux memory machines for traction applications: A review," *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 34–50, 2020, DOI: <https://doi.org/10.23919/tems.2018.8326450>
- [32] A. Emadi, A. Khaligh, C. H. Rivetta, and G. A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: Definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 4, pp. 1112–1125, 2006, DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2006.877483>
- [33] D. Yin and Y. Hori, "Traction control for EV based on maximum transmissible torque estimation," *Int. J. Intell. Transp. Syst. Res.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–9, 2010, doi: 10.1007/s13177-009-0005-x.
- [34] Y. Sun, H. Yue, J. Zhang, and C. Booth, "Minimization of Residential Energy Cost Considering Energy Storage System and EV with Driving Usage Probabilities," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 1752–1763, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2870561>
- [35] B. Gao, L. Guo, Q. Zheng, B. Huang, and H. Chen, "Acceleration speed optimization of intelligent EVs in consideration of battery aging," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 9, pp. 8009–8018, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2840531>
- [36] A. Lucas, F. Bonavitacola, E. Kotsakis, and G. Fulli, "Grid harmonic impact of multiple electric vehicle fast charging," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 127, pp. 13–21, 2015, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.05.012>
- [37] H. J. Raherimihaja, Q. Zhang, G. Xu, and X. Zhang, "Integration of Battery Charging Process for EVs into Segmented Three-Phase Motor Drive with V2G-Mode Capability," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 4, pp. 2834–2844, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2978684>
- [38] L. Zhou, Y. Zhang, X. Lin, C. Li, Z. Cai, and P. Yang, "Optimal sizing of PV and bess for a smart household considering different price mechanisms," *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 41050–41059, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2845900>
- [39] J. Y. Yong, V. K. Ramachandaramurthy, K. M. Tan, and N. Mithulananthan, "Bi-directional electric vehicle fast charging station with novel reactive power compensation for voltage regulation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, pp. 300–310, 2015, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.07.025>
- [40] C. H. Dharmakeerthi, N. Mithulananthan, and T. K. Saha, "Impact of electric vehicle fast charging on power system voltage stability," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 57, pp. 241–249, 2014, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.12.005>
- [41] C. D. M. Affonso and M. Kezunovic, "Technical and economic impact of pv-bess charging station on transformer life: A case study," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 4, pp. 4683–4692, 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2866938.
- [42] Y. Yoo, G. Jang, and S. Jung, "A Study on Sizing of Substation for PV with Optimized Operation of BESS," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 214577–214585, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3040646>
- [43] S. Yoon, K. Park, and E. Hwang, "Connected electric vehicles for flexible vehicle-To-grid (V2G) services," *Int. Conf. Inf. Netw.*, pp. 411–413, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1109/ICOIN.2017.7899469>
- [44] J. Iria, M. Heleno, and G. Candoso, "Optimal sizing and placement of energy storage systems and on-load tap changer transformers in distribution networks," *Appl. Energy*, vol. 250, no. May, pp. 1147–1157, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.120>
- [45] R. Li, W. Wang, and M. Xia, "Cooperative Planning of Active Distribution System with Renewable Energy Sources and Energy Storage Systems," *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 5916–5926, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2785263>

- [46] J. Su, T. T. Lie, and R. Zamora, "Integration of Electric Vehicles in Distribution Network Considering Dynamic Power Imbalance Issue," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 5, pp. 5913–5923, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2990106>
- [47] E. Xydias, C. Marmaras, and L. M. Cipcigan, "A multi-agent based scheduling algorithm for adaptive electric vehicles charging," *Appl. Energy*, vol. 177, pp. 354–365, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.034>