

La flexibilidad y otros retos de la integración masiva de generación eólica y solar en los sistemas de potencia

Ana Ríos^{a1} , Carlos A. Medina C. ¹ ,
Guadalupe González¹ 

¹ Grupo de Investigación para la Simulación, Modelaje y Análisis de Redes, Tecnologías y Sistemas Energéticos (SMARTS-E), Universidad Tecnológica de Panamá

{ana.rios2; carlos.medina; guadalupe.gonzalez}@utp.ac.pa

DOI: 10.33412/pri.v13.1.3229



Resumen: Con la integración masiva de fuentes de energía renovable, principalmente eólica y solar, la flexibilidad de los sistemas de potencia tiene especial importancia, pues es necesaria para responder a la naturaleza variable e intermitente de estas fuentes. Además de la flexibilidad, la integración masiva de fuentes renovables trae consigo otros retos y requerimientos en la planificación y operación habitual del sistema de potencia. Los mismos son de naturaleza, no solo técnica, sino también económica, regulatoria y socio-ambiental.

Este trabajo de divulgación tecnológica, basado en una revisión de literatura especializada, proporciona una visión general de los retos y posibles soluciones que se tienen con la integración masiva de fuentes de energía renovable variables, principalmente, eólica y solar a nivel de grandes generadores. Particularmente, se trata el reto de la flexibilidad y sus problemas asociados, así como sus posibles soluciones de carácter técnico.

De la visión general expuesta, se extraen varias ideas conclusivas en este trabajo, resaltando que para una integración de energías renovables efectiva y eficiente en los sistemas de potencia es necesario aumentar la flexibilidad de los mismos, lo que exige repensar la planificación, el diseño, y la operación de los sistemas de una forma holística incluyendo elementos técnicos, económicos, ambientales y sociales.

Palabras claves: integración de energía renovable, sistema de potencia, flexibilidad, energía eólica, energía solar.

Title: Flexibility and other challenges in the large-scale integration of wind and solar generation into the power systems

Abstract: With the massive integration of renewable energy sources, mainly wind and solar, the flexibility of power systems has special importance, as it is necessary to respond to the variable and intermittent nature of these sources. In addition to flexibility, the massive integration of renewable sources brings with it other challenges and requirements in the planning and

routine operation of the power system. They are not only of technical nature but also of economic, regulatory, and social-environmental nature.

Based on a review of specialized literature, this technological dissemination work provides an overview of the challenges and possible solutions that exist with the massive integration of variable renewable energy sources, mainly wind and solar at the level of large generators. In particular, it deals with the challenge of flexibility, its associated problems, and some possible technical solutions.

From the general vision presented, several conclusive ideas are extracted in this work, highlighting that for an effective and efficient integration of renewable energies in power systems, it is necessary to increase their flexibility, which requires rethinking the planning, design, and operation of the systems in a holistic way including technical, economic, environmental and social elements.

Key words: renewable energy integration, power system, flexibility, wind energy, solar energy.

Tipo de artículo: investigación.

Fecha de recepción: 25 de agosto de 2021.

Fecha de aceptación: 31 de enero de 2022.

1. Introducción

A nivel mundial, la implementación de una estrategia de energía limpia tiene particular importancia y urgencia. Temas asociados a los efectos de invernadero por emisiones de gases, eficiencia energética y descarbonización son aspectos prioritarios en las políticas globales. Ejemplo de esto es el Acuerdo de París, ratificado por 196 países, y los objetivos de varios países como los de Estados Unidos de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 50% para el año 2030 y generar el 100% de su electricidad sin contaminación de carbono para el año 2035 [1], o la Unión Europea, que propone reducir al menos el 55% de las emisiones de carbono para esa fecha, y contar con al menos un 32% de generación con energías renovables [2], o China y Japón, que también esperan llegar a la neutralidad de carbono para el 2060 y 2050, respectivamente [3].

En estas estrategias de energía limpia, uno de los elementos de mayor impacto es la descarbonización del sector eléctrico, para lo cual la integración de fuentes de energía renovable es una de las acciones prioritarias. Así, vemos que la generación basada en fuentes renovables, principalmente solar, eólica e hídrica, ha tenido un crecimiento en las últimas décadas, aumentando su capacidad, en el año 2020, en un 10.3%, con lo que representó el 82% en la expansión de la capacidad instalada a nivel mundial [4].

Tradicionalmente, los estándares de operación y planificación de los sistemas de potencia se han basado en supuestos de recursos centralizados, de alta inercia y con disponibilidad controlada. Pero ahora, con la integración de más fuentes de energía renovable no solo se afecta las condiciones de planificación y operación anteriores, sino que se introducen otras variables que afectan el control y el pronóstico, así como la

confiabilidad y seguridad de los sistemas de potencia, entre otros elementos [5].

La integración de fuentes renovables, particularmente las variables, i.e., solar y eólica, presenta muchos retos, pero también grandes oportunidades. Estos retos y oportunidades, no solo residen en las propias tecnologías de energía renovable, sino en la armonización de estas con otros componentes del sistema de potencia. Incrementar la flexibilidad de las redes de potencia actuales es uno de los retos principales para lograr una integración significativa de fuentes de energía renovable variables (ERV) [5-7]. En Panamá, la Secretaría de Energía reconoce la flexibilidad como una forma esencial de acomodar las cantidades crecientes de energías renovables, considerando este elemento una línea de acción prioritaria para la innovación del Sistema Interconectado Nacional (SIN), como parte de la Agenda de Transición Energética [8].

En consecuencia, se requiere una revisión de la estructura y operación de las redes existentes y un enfoque integral desde la planeación a la operación de las redes que incorporen fuentes ERV. Estas tienen ciertas características que requieren medidas particulares para su integración: i) variabilidad debido a la disponibilidad temporal de recursos; ii) incertidumbre debida a cambios inesperados en la disponibilidad de recursos; iii) propiedades específicas de la ubicación debido a la disponibilidad geográfica de recursos; y iv) bajos costos marginales ya que los recursos están disponibles gratuitamente [5].

La integración de generación renovable puede darse de dos maneras: como generación distribuida o como generación centralizada. La primera se refiere a la instalación de pequeñas unidades de generación, típicamente de 5 a 500 kW, a nivel de la red de distribución que usualmente son instaladas para el uso directo del consumidor en su propiedad. La generación distribuida también se refiere a pequeñas centrales, de 500 kW a 5 MW para el consumo de una comunidad, conectadas próximas al centro de consumo y directamente a la red de distribución. Por otro lado, la generación centralizada se refiere a la instalación de grandes centrales, de varios a cientos de mega watts, generando a alta tensión y conectadas a la red de transmisión para su transporte hacia los centros de consumo donde utilizan las redes de distribución para la entrega [9].

Ambos esquemas de integración de energías renovables suponen transformaciones sustanciales para las redes de transmisión y distribución, y requieren cambios importantes en la planificación y operación habituales, así como sistemas adicionales para garantizar la confiabilidad y seguridad de la red y del suministro.

En el caso de Panamá, en la Agenda de Transición Energética se consideran estrategias de innovación en las redes de transmisión y distribución. Asimismo, la Empresa de Transmisión Eléctrica S.A. (ETESA), como parte del Plan de Expansión del Sistema Interconectado Nacional, ha establecido un Plan de Expansión de Transmisión, que contempla introducir mejoras en el sistema de transmisión en cuanto a capacidad, comunicación, seguridad y actualización del sistema [10].

La integración de fuentes ERV debe tomar en consideración aspectos técnicos, como la combinación o complemento de la

misma con tecnologías de redes inteligentes, almacenamiento de energía y generación flexible; aspectos económicos, como el ajuste de las normas necesarias para tener en cuenta la nueva estructura de costos, permitir nuevos servicios y canales de ingresos, y para respaldar nuevos modelos de negocio; aspectos normativos de regulación, como estándares, códigos, otros, y elementos ambientales-sociales como uso de tierras, salud, contaminación visual, otros. En la figura 1 se indican los principales tipos de retos y algunas de las múltiples soluciones a los mismos que enfrentan los sistemas de potencia para lograr una integración masiva de ERV de gran escala.

De lo anterior resulta importante que los responsables de la formulación de políticas adopten una visión a largo plazo para la transición hacia una integración masiva – casi total – de las energías renovables en la generación eléctrica. Además, deben establecer marcos regulatorios y diseños de mercado que fomenten el desarrollo de las mismas y una gestión cónsona del sistema, incluyendo, por ejemplo, nuevos modelos de mercados para intercambio de energía, servicios auxiliares y señalización de precios.

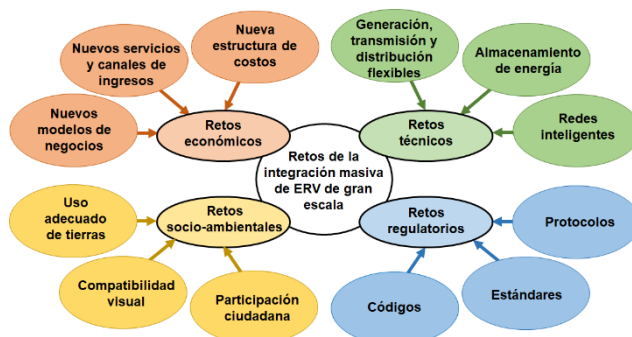


Figura 1. Tipos de retos y algunas soluciones de la integración masiva de ERV en los sistemas de potencia. Fuente: Elaboración propia.

Con este trabajo de divulgación tecnológica, basado en una revisión de literatura especializada, se busca proporcionar una visión general de los retos y posibles soluciones que se tienen con la integración masiva de fuentes de energía renovable variables, particularmente, eólica y solar a nivel de grandes generadores. Se trata principalmente el reto de la flexibilidad y aspectos de planificación, operación, y algunas soluciones técnicas, sin entrar a revisar en detalle otros retos, problemas y soluciones de naturaleza económica, regulatoria y ambiental-social.

A continuación, se provee (i) un resumen de los principales beneficios de las ERV y algunas transformaciones necesarias para la integración de las mismas en los sistemas de potencia, (ii) consideraciones sobre el reto de aumentar y garantizar la flexibilidad de los sistemas de potencia para integrar fuentes renovables, principalmente la planificación y operación flexibles, (iii) una descripción de algunos problemas que se pueden presentar en la calidad de la energía y problemas asociados, particularmente, a la generación eólica y solar fotovoltaica, (iv) una discusión de algunas soluciones técnicas, en especial, tecnologías para una transmisión flexible y sistemas de

almacenamiento, y finalmente (v), un sumario con las principales ideas de este trabajo.

2. Beneficios de las fuentes de energía renovable y transformaciones del sistema de potencia

El uso de energías renovables trae amplios beneficios más allá de los ecológicos, como beneficios económicos y sociales. Además, la tendencia en caída de su costo y mejora en su eficiencia hacen de estas tecnologías una alternativa altamente competitiva con los combustibles fósiles y una medida efectiva contra el cambio climático y la reducción de emisiones de carbono.

Algunos de los beneficios de las fuentes de energía renovable para generación eléctrica son:

- Emisión nula o muy baja de gases de efecto invernadero y contaminantes del aire, ayudando a mitigar el cambio climático. Un estudio en EE. UU. encontró que un 35% de penetración de energías renovables reduciría las emisiones de CO₂ en un 25-45% [11].
- Generación eléctrica a costos bajos, evitando la volatilidad en los precios de los combustibles y aprovechando la tendencia de caída en los costos de tecnologías renovables. En los últimos 10 años, el costo de la energía solar fotovoltaica se ha reducido en un 85% y la energía eólica en un 48%, llegando a niveles altamente competitivos con los combustibles fósiles e incluso a costos menores [12].
- Las plantas solares y eólicas pueden ser construidas con un impacto ambiental mínimo. Los proyectos eólicos tienen el menor impacto ambiental de todas las tecnologías y pueden brindar beneficios al permitir usar las tierras para pastoreo. Las plantas solares pueden ser construidas de tal manera que protejan la vida silvestre, mejoren la salud del suelo y promuevan la retención de agua. Además, estas plantas no requieren del uso de oleoductos o camiones para el transporte de combustible, los cuales producen impactos negativos en el ambiente [13].
- Las plantas eólicas y solares pueden operar por décadas y se desarrollan en menos tiempo que otras tecnologías. Las turbinas eólicas tienen una vida útil de alrededor de 20 años y los paneles solares de 25-40 años. Además, estas plantas pueden ser puestas en operación en menos de dos años, mientras que otras plantas que utilizan combustibles fósiles requieren hasta cuatro años para ser puestas en marcha [14].
- Las energías renovables hacen al sistema más seguro y resiliente al no depender de fuentes de energía externas y aprovechar los recursos locales.
- Ayudan a reducir la pobreza y apoyar el desarrollo económico local, estas tecnologías atraen nuevas industrias y negocios, creando así nuevas plazas de trabajo y permitiendo el alcance de la energía a más personas [14].

Pero la integración significativa de energías renovables variables en las redes eléctricas requiere una transformación sustancial de las mismas para [5]:

- establecer mecanismos eficientes de gestión de la red y la demanda de electricidad, que permitan tratar con la creciente complejidad, reducir las cargas pico, mejorar la flexibilidad de la red, la capacidad de respuesta y la seguridad del suministro, enfrentando una mayor variabilidad del sistema;
- mejorar la interconexión de redes a nivel nacional, regional e internacional, con el objetivo de incrementar la flexibilidad, capacidad, confiabilidad y estabilidad de las redes;
- introducir tecnologías y procedimientos que garanticen la estabilidad y el control adecuados del funcionamiento de la red, así como la flexibilidad de la misma;
- permitir un flujo bidireccional de energía – del sistema a los usuarios finales y de los usuarios a la red (como suministradores de electricidad) con el objetivo de garantizar la estabilidad de la red al instalar generación distribuida;
- introducir sistemas de almacenamiento de energía para guardar los excedentes sobre la demanda, aumentar la flexibilidad del sistema y asegurar el suministro.

Desde el punto de vista tecnológico, lo anterior puede lograrse con el uso de tecnologías de redes inteligentes (Smart Grid) que incorporan tecnologías modernas de información, comunicación, computación y control para mejorar la funcionalidad del sistema de energía. Esto permitirá una amplia gama de capacidades autónomas de supervisión, control y gestión para aumentar la flexibilidad, mejorar la confiabilidad y respaldar la integración masiva de las energías renovables.

3. El reto de la flexibilidad en la integración de energías renovables

Entre los retos más importantes que se tienen para lograr una alta penetración de energías renovables, particularmente variables, en los sistemas de potencia, está mejorar la flexibilidad del sistema [6]. Otros retos son: el acceso a las fuentes, mejorar la estabilidad y la confiabilidad, y aumentar la resiliencia del sistema. Además, se observan distintos fenómenos o problemas específicos debido a una alta penetración de distintas tecnologías, particularmente eólica y solar.

Podemos definir la flexibilidad como la capacidad de un sistema de energía para gestionar de forma fiable y rentable la variabilidad e incertidumbre de la generación y la demanda en reacción a una variabilidad anticipada o imprevista y sostener el suministro durante desbalances grandes y transitorios en todas las escalas de tiempo relevantes [15].

A medida que la penetración de energías renovables aumenta, la variabilidad se vuelve un parámetro más difícil de controlar. Para contener la variabilidad y mejorar la flexibilidad, se pueden tomar múltiples acciones como: aumentar la generación por medio de reservas convencionales de rápida acción cuando se espera que la generación de energía renovable decrezca; utilizar tecnologías de almacenamiento de energía, expandir y reforzar la interconexión de las redes, aumentar la integración de diversas fuentes en áreas espacialmente extendidas, usar sistemas de predicción de riesgos – identificación de fluctuaciones críticas, mejorar los algoritmos de predicción de la

generación y la carga, reestructurar los mercados para remunerar la flexibilidad, entre otros [16].

Operadores y reguladores de sistemas de potencia reconocen que para transformar estos sistemas y lograr una penetración masiva de fuentes ERV, es necesario mejorar y aprovechar la flexibilidad en todas sus partes. Esto abarca desde una generación más flexible (con plantas de energía que puedan aumentar y disminuir la generación de manera rápida y eficiente y funcionar a niveles bajos de producción) hasta sistemas de transmisión y distribución más robustos (con capacidad suficiente y tecnología de redes inteligentes), sistemas de almacenamiento, recursos del lado de la demanda más flexible (que incorporen redes inteligentes, generación distribuida, control directo de carga, entre otros) y operaciones flexibles del sistema. Algunos requerimientos para lograr la flexibilidad de un sistema con ERV se resumen en la figura 2. A continuación se tratan algunas de estos temas.

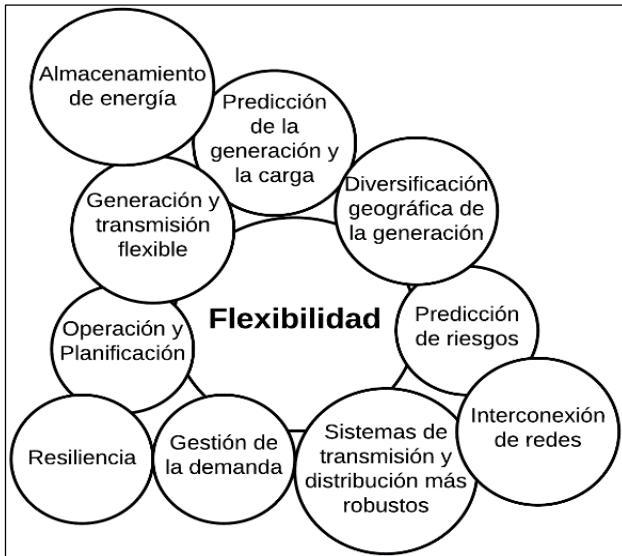


Figura 2. Elementos para aumentar la flexibilidad de un sistema de potencia con ERV de gran escala. Fuente: propia.

4. Retos en la planificación y operación del sistema

La integración de recursos eólicos y solares agrega un grado de complejidad a la planificación y operación de los sistemas de potencia. Como se ha indicado, esto se debe, principalmente, a una mayor variabilidad e incertidumbre asociadas con estos recursos. Por eso, se requiere de estudios de planificación adecuados que incluyan estudios de integración para identificar los requisitos de flexibilidad necesarios y el impacto en la operación, con el objetivo de lograr un funcionamiento confiable y económico del sistema de potencia.

Considerar la flexibilidad en la planificación y operación del sistema de potencia resulta crítico ya que de otra forma al aumentar la inclusión de fuentes ERV, pueden aparecer problemas de flexibilidad y necesitarse, entonces, soluciones urgentes costosas y poco eficientes.

4.1 Planificación

Los modelos de planificación de sistema utilizados tradicionalmente no son aplicables a sistemas que pasan por una transformación que incluye la penetración de energías renovables variables. Por eso, la planificación de la flexibilidad tiene que ser un proceso continuo basado en herramientas y métodos sofisticados que debe responder a un entorno dinámico y tomar en cuenta los desarrollos y requerimientos en las áreas no solo de tecnología y ciencia, sino también de política, economía y sociedad. Para la planificación adecuada, se deben tomar en cuenta todas las variaciones producto de la generación variable, desde la demanda, hasta la entrega y conversión de la energía [17].

Así, los nuevos modelos deben considerar cambios en las tecnologías de generación, en los datos recopilados durante la operación, en la escala de tiempo, nuevas restricciones en la planificación y en los resultados de la operación general del sistema. Los cambios a considerar en la planificación de sistemas con alta penetración de energía renovable se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Cambios para la planificación con alta penetración de energía renovables

| | Planificación tradicional | Nueva planificación |
|----------------------------------|--|---|
| Tecnologías de generación | Hídrica, térmica, eólica, solar, biomasa, etc. | Hídrica, térmica, eólica, solar, biomasa, etc. Más recursos de flexibilidad: unidades gestionables (controlables), sistemas de almacenamiento, otros sistemas auxiliares |
| Datos | Demanda, parámetros tecno-económicos | Demanda, información meteorológica, producción de energía variable horaria, parámetros tecno-económicos |
| Escala de tiempo | Anual | Horaria o mayor granularidad |
| Restricciones | Expansión de la capacidad de generación y transmisión, generación, balance, emisiones de CO ₂ | Expansión de la capacidad de generación y transmisión, generación, balance, emisiones de CO ₂ Más restricciones de operación: generación gestionable, transacciones de energía, almacenamiento de energía |
| Resultados | Costo del sistema, esquema de expansión de capacidad, emisiones de CO ₂ | Costo del sistema, esquema de expansión de capacidad, operación horaria del sistema, estrategias de flexibilidad, emisiones de CO ₂ |

Fuente: adaptado de [16]

4.2 Operación

La principal característica de las energías renovables es la variabilidad de los recursos, lo que genera incertidumbre en la generación en la escala de segundos, horas y días. Debido a la característica intermitente de estos recursos, se vuelve difícil el uso de las energías renovables para la operación y regulación del sistema como plantas normales, lo que afecta la operación segura y estable del sistema [18].

Un problema del aumento de la penetración de las fuentes ERV, es que la variabilidad se vuelve más difícil de compensar y se acaba por abrumar la capacidad de los recursos convencionales de contrarrestar la variabilidad, por lo que se hace necesario capturar la energía solar, eólica y de otras fuentes renovables para su uso posterior [19].

Otro reto que se enfrenta con las energías renovables es el recorte de la generación. Debido a la intermitencia de los recursos solares y eólicos, las plantas son sobredimensionadas para poder suplir la demanda, pero en ocasiones cuando hay mayor disponibilidad del recurso, no es viable aprovechar toda la generación, por lo que el exceso de energía debe ser recortado [12],[20].

Con una alta penetración de energía renovable se crean problemas para mantener el balance del sistema, volviéndose este más complejo y costoso, lo que puede ser otra razón para recortar la generación debido a congestión en el sistema de transmisión, por límites de capacidad o temperatura, lo que provoca que el operador del sistema deba reemplazar generación menos costosa, usualmente eólica o solar, por plantas más costosas [21], aumentando el costo de la energía para ese instante.

Otros impactos negativos resultantes de la generación renovable en la operación del sistema incluyen problemas de estabilidad debido a desbalances entre generación y demanda, incremento en la necesidad de servicios auxiliares, y un despacho de unidades ineficiente, así como precios reducidos o negativos de la energía [22].

Por lo tanto, la integración de energía renovable requiere adecuar la operación del sistema, particularmente la capacidad de reserva, el manejo del balance y el pronóstico a muy corto plazo del viento y la irradiación solar.

Así, se requiere flexibilidad operativa que permita que un sistema de energía responda de manera eficiente a los cambios en la oferta y la demanda para garantizar la confiabilidad en todas las escalas de tiempo. Los beneficios de la flexibilidad pueden incluir una reducción en recorte de las energías renovables, una menor variabilidad de precios, mejores retornos de la inversión y beneficios ambientales relacionados con una mayor utilización de las energías renovables.

5. Impacto en la calidad del suministro

La alta penetración de energía renovable afecta diversos aspectos de calidad de la energía del sistema, como el voltaje, la frecuencia y la inyección de armónicos al sistema [18], [23].

Fluctuaciones de voltaje y “flicker”: La mayoría de los generadores de energía intermitentes se integran al sistema de tal manera que se crea un gran impulso de corriente cuando empiezan a generar. Por ejemplo, cuando la velocidad del viento es mayor a la velocidad de corte de la turbina, los generadores detienen automáticamente la operación. Si las turbinas de una planta eólica se detienen simultáneamente, resultará una fluctuación de voltaje y parpadeo.

Contaminación de armónicos: Al utilizar convertidores electrónicos de potencia, la generación a partir de fuentes

intermitentes trae armónicos al sistema lo que puede crear distorsión de la onda de voltaje y corriente. En circuitos sinusoidales, la corriente y voltaje armónicos con la misma frecuencia producen potencia activa y reactiva a la misma frecuencia, lo que reduce el voltaje en la red. La contaminación de armónicos es un grave problema de calidad de la energía y resulta en la degradación de los sistemas de la red y los componentes conectados a esta.

Estabilidad de la frecuencia: La influencia de la energía intermitente en la frecuencia del sistema depende de la capacidad de generación intermitente relativa a la capacidad total del sistema. Cuando la proporción de generación variable es grande, la volatilidad de la generación tiene un gran impacto en la frecuencia del sistema, lo que afecta la calidad de la energía y la operación de carga sensible a la frecuencia.

Por otro lado, la ausencia de inercia en la generación eólica y solar reduce la inercia total del sistema, provista por las máquinas rotatorias. Cuando la demanda sobrepasa la generación en un instante o una máquina se desconecta, la energía faltante es suplida por la energía cinética de los rotores de los generadores, lo que ocasiona que la frecuencia del sistema se reduzca. Cuando la generación supera la demanda la frecuencia del sistema aumenta. Si la frecuencia se excede de ciertos límites, las máquinas se desconectan para evitar daños, lo que puede ocasionar una interrupción del suministro. Este fenómeno ocurre más frecuentemente con la presencia de energías renovables, pues aumentan la impredecibilidad de la generación y hacen más difícil gestionar la operación [6].

6. Problemas particulares de una alta penetración de generación eólica y solar

A pesar del impulso para lograr una alta penetración de generación eólica y solar, su inclusión en las redes de potencia y sus impactos siguen siendo un tema complejo. Y es que su naturaleza y los costos asociados aún no están bien definidos y no se tienen marcos regulatorios completos establecidos.

A pesar de los múltiples y claros beneficios, también presentan varios retos y problemas. Por ejemplo, actualmente existe el debate sobre los costos de estas plantas en términos de un funcionamiento menos eficiente y más desgaste de los equipos dentro del sistema que tienen que, por ejemplo, aumentar y disminuir la generación (plantas tradicionales) de manera rápida para compensar la variabilidad, lo que significa potencialmente más emisiones y mayores costos.

A continuación se tratan algunos de los problemas más comunes asociados con la generación eólica y solar fotovoltaica.

6.1 Generación eólica

La naturaleza aleatoria del recurso eólico provoca que las plantas eólicas generen energía fluctuante, lo que tiene un impacto negativo en la estabilidad del sistema y en la calidad de la energía. Alteraciones en el viento provocan variaciones en la velocidad de las turbinas, lo que altera la potencia inyectada al sistema conduciendo a variaciones del voltaje. Esta alteración se propaga en el sistema y se produce el fenómeno de “flicker” o parpadeo [24].

Los sistemas eólicos tienen problemas para mantener el perfil de voltaje y la mayoría de las turbinas no pueden mantener la potencia reactiva del sistema. Además, la alta penetración de la generación eólica provoca más estrés en los “breakers”, la línea de transmisión y en las barras al momento de una falla, debido a la baja capacidad de los generadores de soportar fallas.

De acuerdo con un estudio, la penetración de energía eólica de 10% aumentó la necesidad de reserva en un 1.5-4% de la capacidad instalada eólica y determinó que mientras menor sea la mínima potencia de salida que pueda cubrir la demanda, mayor será la penetración de energía renovable que podrá ser alojada en el sistema sin la necesidad de apagar plantas [25].

6.2 Generación solar

Los problemas relacionados con la generación solar son: alto costo de instalación de los paneles, baja capacidad de generación, incertidumbre de la irradiación solar y fluctuaciones en la generación debido al comportamiento intermitente de la luz solar [24]. La alta penetración de energía solar afecta el perfil del voltaje y la respuesta en frecuencia del sistema. Además, estos sistemas no proporcionan ningún soporte al momento de una falla y dado que no tienen inercia se requiere de sistemas adicionales para mantener la oscilación de frecuencia.

Un estudio encontró que el parámetro que se ve más afectado debido a la alta penetración de energía solar es la magnitud de voltaje, observando sobre voltajes en las barras de las líneas de transmisión, especialmente a una penetración de 20% o más [26]. Simulaciones muestran que a ese nivel de penetración la estabilidad de la frecuencia del sistema es afectada negativamente [27].

Además, la capacidad de una planta solar puede verse afectada significativamente por nubes que pasan durante el día, y que provocan fluctuaciones de potencia.

7. Requerimientos de las plantas para su interconexión al sistema de potencia

Los requerimientos técnicos para la integración de ERV al sistema de potencia son determinados por el diseño y capacidad de la planta, así como por otros factores, incluyendo el perfil de la red y el mercado eléctrico, además del nivel de penetración de ERV.

Los principales requerimientos impuestos para la integración de ERV son [28]:

Reserva rodante: las unidades de generación deben tener la capacidad de proveer suministro con alta flexibilidad y sensibilidad a la frecuencia del sistema. Así, en un sistema con alta penetración de ERV, es necesario contar con la capacidad de cuantificar, dinámica y proporcionalmente las reservas rodantes para la generación esperada.

Inercia sintética: ya que los generadores de ERV no proveen inercia al sistema, se vuelve necesaria la introducción de inercia sintética o virtual para mejorar la estabilidad y confiabilidad del sistema.

Pronóstico y análisis: la alta variabilidad de las ERV vuelve crítica el pronóstico del tiempo y de la generación para mantener

la estabilidad y confiabilidad de la red, además de ser necesaria para facilitar y mejorar la integración a gran escala de ERV.

Arranque autónomo (black start): se refiere al proceso de restablecer una planta sin depender de la red de transmisión luego de un corte del suministro. Los principales requerimientos para el arranque autónomo con ERV incluyen la capacidad de proveer altas corrientes de arranque necesarias para un arranque frío, la capacidad de mantener el voltaje dentro de límites aceptables y la capacidad de proveer soporte para el arranque autónomo por un período suficiente para no perjudicar el restablecimiento del sistema.

8. Algunas soluciones técnicas

Hay varias soluciones técnicas, incluyendo tecnologías y regulaciones, que pueden ayudar a integrar ERV en la red del sistema de potencia y mejorar la flexibilidad del mismo, así como resolver problemas específicos. Entre las múltiples soluciones técnicas, a continuación se tratan las redes inteligentes, las extensiones e interconexión de redes de transmisión y tecnologías para transmisión flexible, los sistemas de almacenamiento de energía, la generación distribuida, y los protocolos y códigos de conexión y operación para limitar posibles problemas técnicos.

8.1 Redes inteligentes

Una red inteligente es una red eléctrica con una nueva arquitectura integrada de generación, transmisión, distribución e incluso consumo, basada en tecnologías de información, comunicación, computación y control que permiten una amplia gama de funcionalidades y capacidades autónomas de supervisión, control y gestión.

Estas redes están destinadas a mejorar la eficiencia energética general del sistema de energía, garantizar la confiabilidad y utilización de la red, reducir las interrupciones, minimizar los costos, mejorar los mercados, e incrementar el rendimiento financiero de las inversiones.

Así, las redes inteligentes pueden desempeñar un papel crucial para la integración masiva de energías renovables variables y soportar la generación distribuida, mejorando la flexibilidad del sistema de potencia. Por ejemplo, con una red inteligente se podrían gestionar y coordinar, en tiempo real, las fuentes ERV con los sistemas de almacenamiento y las cargas evitando los efectos de la incertidumbre e intermitencia propias de las ERV y la demanda, o utilizar información detallada de la interacción de las fuentes ERV con los sistemas de transmisión y distribución para mejorar la confiabilidad y reducir costos.

8.2 Mejoras en el sistema de transmisión

La mejora del sistema de transmisión es primordial para aumentar la flexibilidad de los sistemas de potencia y permitir la integración masiva de energías renovables [29],[30]. En este aspecto, se destacan las tecnologías de transmisión a corriente continua de alta tensión (HVDC) y los sistemas de transmisión de corriente alterna flexibles (FACTS), así como otras tecnologías y prácticas que mejoran la eficiencia del uso de la red de transmisión.

HVDC: La tecnología de transmisión por alto voltaje DC (HVDC), utilizada anteriormente para transportar grandes cantidades de energía a largas distancias, resulta una excelente alternativa para transportar generación eólica desde áreas alejadas, como las áreas costeras, que tiene un recurso eólico de alta calidad. Esta tecnología podría mitigar los problemas de operación que resultan de la generación solar y eólica como el desbalance en generación en relación con la necesidad de servicios auxiliares asociada a las energías renovables.

Entre las ventajas de la transmisión HVDC están: menores costos de operación en comparación a líneas de corriente alterna, menores pérdidas de efecto piel, menores pérdidas de energía a largas distancias a voltajes similares a sistemas de corriente alterna. La principal desventaja de estos sistemas es que solo se vuelven más económicamente rentables que los sistemas de corriente alterna cuando superan los 200 km de longitud [31].

FACTS: Los sistemas de transmisión AC flexible (FACTS – Flexible AC Transmission Systems) son una tecnología basada en dispositivos de electrónica de potencia que permiten mejorar la capacidad, estabilidad y flexibilidad de los sistemas de transmisión AC. Además, posibilitan la transmisión de grandes cantidades de energía renovable.

Entre los dispositivos FACTS se incluyen, entre otros, los capacitores en serie controlados por tiristores (TCSC), los compensadores síncronos estáticos (STATCOM) y los reactores de derivación controlables (CSR).

Los TSC pueden ser conectados a las líneas de transmisión para controlar el flujo de energía, aumentar los límites de transmisión, mejorar la estabilidad de transitorios y mitigar las oscilaciones. Otros elementos como SVC, STATCOM y CSR, pueden ser instalados en derivación en las barras de una subestación para resolver la compensación de potencia reactiva y problemas de control de voltaje. Los SVC o STATCOM también pueden ser utilizados para mejorar el desempeño de plantas de generación renovable para alcanzar los requerimientos de control de voltaje y potencia reactiva [32].

Capacidad dinámica de línea: La tecnología de capacidad dinámica de línea (DLR – Dynamic Line Rating) es una solución ante la congestión debido al límite de temperatura de los componentes de la red. Se refiere a la habilidad de variar la capacidad térmica de los cables aéreos de transmisión o distribución, de manera dinámica en tiempo real, dependiendo de las condiciones ambientales variables (temperatura ambiente, radiación solar, velocidad y dirección del viento), con el objetivo de maximizar la carga en todo instante de tiempo y minimizar la congestión de la red [33].

Así, la aplicación de DLR permite responder a la rápida integración de energías renovables en el sistema, promoviendo un mejor uso de la infraestructura actual junto al incremento de la penetración de energías renovables.

Esta solución aparenta ser especialmente beneficiosa al ser aplicada en líneas que transportan energía eólica debido a la alta correlación entre la entrega de esta energía y los efectos refrescantes del viento. Cuando un área con vastos recursos eólicos se encuentra lejos de los centros de consumo, la carga de la línea aumenta al punto que los procedimientos de operación de

la red habituales deben ser modificados para garantizar la seguridad de la red. Sin embargo, la presencia de los vientos puede reducir la temperatura de los cables a través de la convección, también llamado “enfriamiento concurrente” (concurrent cooling). Bajo estas condiciones se estima que se puede incrementar la capacidad de cables de transmisión en un 100%-200% [33].

Así, el DLR facilita la integración de una mayor proporción de generación renovable al aumentar la capacidad efectiva de la red de transmisión o distribución. Los beneficios de esta práctica son la reducción de la congestión en la red y por lo tanto del recorte de la generación y del despacho de la generación costo-efectivo.

8.3 Sistemas de almacenamiento

El almacenamiento de energía es extremadamente importante en sistemas con alta penetración de energías renovables, y puede ser utilizado para una variedad de funciones como regulación, seguimiento de la carga y para añadir o retirar energía del sistema cuando hay una falta o exceso de energía renovable [16].

La instalación de sistemas de almacenamiento facilita el desarrollo y despacho de energías renovables, mitigando la volatilidad de la generación y manteniendo la seguridad y eficiencia del sistema. Estos sistemas pueden ser instalados a nivel de transmisión o distribución.

A nivel de transmisión las opciones incluyen: centrales de bombeo, aire comprimido y volante de inercia. A nivel de distribución se pueden instalar baterías convencionales, baterías de flujo electroquímico y superconductores (SMES). Las baterías también pueden ser acopladas a turbinas eólicas y paneles solares individuales o en pequeños grupos, para mitigar las fluctuaciones y los problemas de calidad de energía [19].

El almacenamiento también puede ayudar a controlar la capacidad de transmisión de recursos de energía eólica. Al añadir capacidad de almacenamiento, las plantas eólicas ubicadas en áreas remotas pueden almacenar energía de períodos pico, permitiendo un menor costo. Ya que la energía generada puede ser almacenada en lugar de ser usada en tiempo real, se reduce la necesidad de líneas de transmisión y también permite a los distribuidores maximizar las ganancias al vender la energía en las horas pico, de mayor costo, que no suelen corresponder con los períodos de generación eólica máxima.

8.4 Generación distribuida

Otra opción para integrar generación renovable sin cargar el sistema de transmisión es la generación distribuida. Este término se refiere a la generación dentro del sistema de distribución, cercano a la carga y usualmente en pequeñas capacidades (500 kW a 1 MW) [34].

Ya que estas instalaciones están más próximas a los centros de consumo, se reducen las pérdidas de transmisión, mejorando la eficiencia del sistema y minimizando la congestión del sistema. La generación distribuida puede posponer la expansión y actualización de los sistemas de transmisión y de nuevas plantas de gran capacidad. Además, aumenta la confiabilidad del sistema,

mejora la calidad y eficiencia de la energía y pueden servir como suministro de emergencia y proveer soporte de voltaje [35].

Cuando se instalan en ubicaciones óptimas, la generación distribuida puede ayudar a reducir la congestión en el sistema de transmisión y así minimizar el costo de la energía en ese instante. Además, las instalaciones de generación distribuida pueden servir como respaldo en caso de fallas y tienen la ventaja de ser instaladas con menor riesgo y cambio en la infraestructura existente.

8.5 Regulación

La actualización de protocolos, procedimientos y códigos a través del sistema es importante para controlar la variabilidad e impredecibilidad de la generación variable y para lograr que el sistema sea capaz de responder ante cualquier evento o falla, evitando un apagón.

Diversos países han realizado modificaciones a sus códigos respecto a los requerimientos para la conexión de plantas de generación variable. Entre ellos están Alemania, China, Estados Unidos y Sudáfrica. Los requerimientos establecidos se han basado principalmente en cuatro categorías: soporte de falla (Fault ride through – FRT), límites de voltaje y frecuencia, control de potencia activa y frecuencia, y control de voltaje y potencia reactiva [36].

FRT: Este requerimiento se refiere a la variación de voltaje que las plantas deben soportar por un determinado tiempo durante una falla antes de poder ser desconectadas.

Los códigos establecen el nivel de caída de voltaje que las plantas deben soportar durante un tiempo antes de poder ser desconectadas. Igualmente, establecen los niveles de sobrevoltaje que deben ser capaces de soportar y su duración, además del tiempo de recuperación para regresar al valor nominal.

Límites de voltaje y frecuencia: Establece los rangos de voltaje a los que las plantas deben permanecer durante su operación continua. En su mayoría establecen que las plantas deben operar entre un 90-110% del voltaje nominal.

Respecto a la frecuencia, establecen los límites de frecuencia dentro de los cuales deben operar y en caso de ocurrir elevaciones de frecuencia, establecen el tiempo que deben soportar la condición antes de ser desconectadas.

Control de potencia activa y frecuencia: Regulan el control de la potencia activa que debe igualar la variabilidad de la energía solar durante el día y los requerimientos de la red.

El control de potencia activa se refiere a tres requerimientos: la producción absoluta, es decir el valor de potencia activa que el operador requiere que la planta entregue; la producción delta, que determina la reserva de potencia activa, que es un porcentaje de la potencia absoluta que la planta puede entregar en condiciones normales; y el gradiente de potencia, que indica el nivel al que la planta debe incrementar o reducir la potencia activa en valores de MW por minuto.

Control de voltaje y potencia reactiva: Las plantas deben operar en un rango del $\pm 10\%$ del voltaje nominal, para lo que dependen de las características de soporte de potencia reactiva del inversor.

Así, los códigos enfocan el control del voltaje en tres requerimientos: regulación de voltaje, que controla el valor de voltaje; regulación del factor de potencia, que controla la potencia reactiva dependiendo del valor de la potencia activa; y el control de potencia reactiva, que regula esta potencia directamente en la planta.

Conclusión

Sobre la base de la literatura revisada, en este artículo se identifican los retos de la integración de fuentes de energía renovable variables en los sistemas de potencia, estudiando particularmente la flexibilidad, y se describen algunas posibles soluciones técnicas disponibles. De la visión general expuesta, se pueden extraer varias ideas conclusivas de este documento.

- La integración de energías renovables es imprescindible para lograr los objetivos de descarbonización mundial y mitigar los efectos del cambio climático. Además, la introducción de generación renovable trae diversos beneficios a nivel ecológico, económico y social.
- Una transición hacia una alta participación de ERV requiere repensar el diseño, la operación y la planificación de los sistemas de energía desde un punto de vista técnico, económico y ambiental.
- Para gestionar eficazmente las ERV a gran escala, es necesario establecer una serie de fuentes de flexibilidad en el sistema de potencia.
- La flexibilidad debe aprovecharse en todos los sectores del sistema energético, desde la generación hasta la transmisión, distribución, y el usuario final.
- Es necesaria la actualización de los códigos de operación del sistema que establezcan los requerimientos técnicos necesarios para la conexión y operación continua, segura y confiable de las nuevas instalaciones de generación renovable.
- Es imprescindible la expansión e interconexión de las redes de transmisión para soportar la integración masiva de ERV.
- Diversas tecnologías como FACTS, HVDC y DLR están ya disponibles y pueden ser integrados a los sistemas para mejorar la flexibilidad y la eficiencia de la operación de las redes existentes.
- La generación distribuida permite integrar ERV próxima al centro de consumo, liberando así la red de transmisión y disminuyendo las pérdidas y la congestión en las líneas.
- El almacenamiento de energía es indispensable para garantizar la seguridad del suministro, mitigar la variabilidad de la generación y responder ante fallas en el sistema.

Reconocimiento

El apoyo financiero para la investigación de la que este documento es producto fue proporcionado por la SENACYT (Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá) bajo el proyecto FID17-113; CxM 164-2018 – Impacto de la Integración Masiva de Recursos Renovables en el Sistema Nacional de Transmisión Eléctrica.

Referencias

- [1] The White House, *FACT SHEET: President Biden Sets 2030 Greenhouse Gas Pollution Reduction Target Aimed at Creating Good-Paying Union Jobs and Securing U.S. Leadership on Clean Energy Technologies*, The White House, April 22, 2021. Último acceso: Julio 2021. [En Línea]. Disponible: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/04/22/fact-sheet-president-biden-sets-2030-greenhouse-gas-pollution-reduction-target-aimed-at-creating-good-paying-union-jobs-and-securing-u-s-leadership-on-clean-energy-technologies/>
- [2] European Commission, *2030 climate & energy framework*, European Union. Último acceso: Julio 2021. [En Línea]. Disponible: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
- [3] O. Wallach, *Race to Net Zero: Carbon Neutral Goals by Country*, Visual Capitalist, June 8, 2021. Último acceso: Julio 2021. [En Línea]. Disponible: <https://www.visualcapitalist.com/race-to-net-zero-carbon-neutral-goals-by-country/>
- [4] International Renewable Energy Agency, *Renewable capacity highlights*, IRENA, March 31, 2021.
- [5] IEA-ETSAP and IRENA, *Renewable Energy Integration in Power Grids, Technology Brief E15 – April 2015*.
- [6] M. Di Silvestre, S. Favuzza, E. Riva, G. Zizzo, "How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 93, pp. 483-498, 2018.
- [7] E. Lannoye, D. Flynn and M. O'Malley, "Transmission, Variable Generation, and Power System Flexibility," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 30, No. 1, pp. 57-66, Jan. 2015.
- [8] Secretaría Nacional de Energía, *Lineamientos estratégicos Agenda de transición energética 2020-2030*, Gaceta Oficial, Ciudad de Panamá, No. 29163-B, 26 de noviembre, 2020.
- [9] K. Cleary y K. Palmer, "Renewables 101: Integrating Renewable Energy Resources into the Grid," *Resources for the Future*, April 15, 2020.
- [10] Gerencia de Planificación, *Plan de Expansión del Sistema Interconectado Nacional 2019 – 2033 Tomo III Plan de Expansión de Transmisión*, ETESA, Ciudad de Panamá, julio 2020.
- [11] The National Renewable Energy Laboratory, "Western Wind and Solar Integration Study: Executive Summary," NREL, May 2010.
- [12] REN21, *Why is renewable energy important?*, REN21, May 28, 2019. Último acceso: Julio, 2021. [En Línea]. Disponible: <https://www.ren21.net/why-is-renewable-energy-important/#key-benefits>
- [13] S. Tierney y L. Bird, "Setting the Record Straight About Renewable Energy," World Resources Institute, May 12, 2020.
- [14] REN21, "Renewables in cities 2021 Global Status Report," REN21, Paris, France, 2021. Último acceso: Julio 2021. [En Línea]. Disponible: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REC_2021_full-report_en.pdf
- [15] O. M. Babatunde, J.L. Munda y Y. Hamam, "Power system flexibility: A review," in *CPESE 2019*, Japan, Vol. 6, No. 9, pp. 101-106, 2019.
- [16] B. Kroposki, "Integrating high level of variable renewable energy into electric power systems," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 5, pp. 831–837, Nov 2017.
- [17] X. Deng y T. Lv, "Power system planning with increasing variable renewable energy A review of optimization models", *Cleaner Production*, Vol. 246, Feb 10, 2020.
- [18] M. Ni, F. Xue, Z. Meng, "Integration of Large-Scale Renewable Energy: Experience and Practice in China," *Integration of Large-Scale Renewable Energy into Bulk Power Systems*. Springer, Chap. 2, pp. 27-77, 2017.
- [19] American Physics Society, "Integrating Renewables on the Grid: A Report by the APS Panel on Public Affairs," Jan 1, 2011.
- [20] B. Kroposki, B. Johnson, Y. Zhang, V. Gevorgian, P. Denholm, B. Hodge et al., "Achieving a 100% Renewable Grid," *IEEE Power & Energy Magazine*, March/April, pp. 61-73, 2017.
- [21] L. Bird, D. Lew, M. Milligan, D. Flynn et al., "Wind and solar curtailment: a review of international experience," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 65, pp. 577-586, Nov, 2016.
- [22] U.S. Energy Information Administration, "Assessing HVDC Transmission for Impacts of Non-Dispatchable Generation", EIA, Washington D.C., U.S.A, June, 2018.
- [23] G. Shafiullah, "Impacts of renewable energy integration into the high voltage (HV) networks," *4th International Conference on the Development in the in Renewable Energy Technology (ICDRET)*, pp. 1-7, 2016.
- [24] M. Sandhu, T. Thakur, "Issues, Challenges, Causes, Impacts and Utilization of Renewable Energy Sources – Grid Integration," *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 4, No. 3, pp. 636-643, Mar. 2014.
- [25] H. Holtinen, "Impact on hourly wind power variations on the system operation in the Nordic countries," *Wind Energy: An International Journal for Progress and Application in Wind Power Conversion Technology*, vol. 8, pp. 197-218, 2005.
- [26] S. Eftekharijad, V. Vittal, G. T. Heydt, B. Keel and J. Loehr, "Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 28, No. 2, pp. 893-901, 2013.
- [27] T. Alquthami, H. Ravindra, M. Faruque, M. Steurer y T. Baldwin, "Study of Photovoltaic Integration Impact on System Stability Using Custom Model of PV Arrays Integrated with PSS/E," *North American Symposium*, págs. 1-8, 2010.
- [28] The World Bank, "Grid Integration Requirements for Variable Renewable Energy," World Bank, Washington DC, U.S., 2019.
- [29] E. Martinot, "Grid Integration of Renewable Energy: Flexibility, Innovation, and Experience," *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 41, No. 1, pp. 223-251, Nov. 2016.
- [30] M. Milligan, B. Kirby, T. Acker, M. Ahlstron, B. Frew, M. Goggin, et al., "Review and Status of Wind Integration and Transmission in the United States: Key Issues and Lessons Learned," *National Renewable Energy Laboratory*, Mar. 2015.
- [31] U.S. Energy Information Administration, "Assessing HVDC Transmission for Impacts of Non-Dispatchable Generation, EIA, Washington D.C., U.S.A, June 27, 2018.
- [32] S. Oyedepo, A. Agbetuyi y M. Odunfa, "Transmission Network Enhancement with Renewable Energy", *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, Vol. 5, No. 1, 2014.
- [33] International Renewable Energy Agency, *Innovation landscape brief: Dynamic line rating*, IRENA, 2020.
- [34] T. Ackermann, G. Andersson y L. Söder, "Distributed generation: a definition," *Electric Power Systems Research*, Vol. 57, No. 3, pp. 195-204, Apr. 20, 2001.
- [35] P. Chiradeja, "Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis," *2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, pp. 1-5, 2005.
- [36] A. Cabrera-Tobar, E. Bullich-Massagué, M. Aragüés-Peñalba, O. Gomis-Bellmunt, "Review of advanced grid requirements for the integration of large scale photovoltaic power plants in the transmission system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 62, pp. 971-987, 2016.