

05-014

Selection of criteria for optimal size of solar photovoltaic plants for distributed generation systems

Guido C. Guerrero-Liquet; M. Socorro García-Cascales; J. Miguel Sanchez-Lozano

Universidad Politécnica de Cartagena;

Determining the optimal size of solar photovoltaic plants has been a major challenge for distribution system planners as well as for researchers in the field of renewable energy. Since the optimum dimension to be installed remains an unresolved problem, we intend to identify the economic, environmental and technical advantages of such installations. In this way, the range that we establish to select the optimal dimensioning of one or several photovoltaic systems is of one gigawatt of installed power, by solar photovoltaic technology, to obtain a distribution system with the lowest environmental impact at the lowest possible cost. This paper lists the most important criteria that countless scientific publications define when deciding on the optimal size of photovoltaic solar plants with distributed generation. From the classification of distributed generation, two major groups of alternatives (small / medium) and (large / very large) are proposed for the installation of 1Gw of power by photovoltaic energy. The paper also identifies the indicators that represent all the criteria that affect the system's workings in technical, economic, environmental and social terms.

Keywords: "Distributed Generation; Photovoltaic Systems (PV); Renewable energy; Functionality of the System (FUS); Electric power plant"

Selección de criterios para el dimensionamiento del tamaño óptimo de las plantas solares fotovoltaicas para los sistemas de generación distribuida

Obtener el tamaño óptimo de las plantas solares fotovoltaicas ha sido un gran desafío para los planificadores de sistemas de distribución, así como para los investigadores en el campo de las energías renovables. Dado que la dimensión óptima a instalar sigue siendo un problema sin resolver, pretendemos para ello identificar las ventajas económicas, medioambientales y técnicas de las instalaciones. De este modo, el rango que establecemos para seleccionar el dimensionamiento óptimo de uno o varios sistemas fotovoltaicos es de un gigavatio de potencia instalada, mediante tecnología solar fotovoltaica, para obtener un sistema de distribución con el menor impacto ambiental al menor coste posible. En este trabajo se enumeran los criterios más importantes que un sin número de publicaciones científicas definen a la hora de decidir el tamaño óptimo de las plantas solares fotovoltaicas con generación distribuida. A partir de la clasificación de la generación distribuida se proponen dos grandes grupos de alternativas (pequeña/mediana) y (grande/muy grande) para la instalación de 1Gw de potencia mediante energía fotovoltaica. Asimismo, se determinan los indicadores que representan todos los criterios que afectan a la funcionalidad del sistema en términos técnicos, económicos, medioambientales y sociales.

Palabras clave: "Generación Distribuida; Instalación Solar Fotovoltaicas (ISF); Energías Renovables; Funcionabilidad del Sistema (FUS); Central Eléctrica"

Correspondencia: Msc. Guido C. Guerrero Liquet guidocgl@gmail.com, gcg10@al

Agradecimientos: Este trabajo está parcialmente financiado por los proyectos TIN2014-55024-P del Ministerio de Ciencia e Innovación Español y P11-TIC-8001 de la Junta de Andalucía (incluidos los fondos FEDER) y el proyecto 19882/GERM/15 programa SÉNECA, además de una beca



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

1. Introducción

Actualmente, los países industrializados generan la mayor parte de su electricidad en grandes instalaciones centralizadas, con los combustibles fósiles (principalmente carbón, petróleo y gas), energía nuclear, centrales hidroeléctricas y las grandes plantas de energías solar o eólica (Viral R and Khatod D.K, 2012).

Sin embargo, la ubicación óptima y el correcto dimensionamiento de la generación renovable distribuida continúan siendo hoy en día motivo de investigación. Averiguar el tamaño óptimo y la ubicación de los sistemas de energía ha sido un gran desafío para los planificadores de sistemas de distribución, así como para los investigadores del sector (Ackermanna et al, 2001).

Una estrategia para fortalecer la participación de las energías renovables en los sistemas de generación distribuida reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero, consiste en fomentar el uso de la energía eólica y la energía solar a pequeña, mediana y gran escala. Además, esta acción es vista por la sociedad como una alternativa positiva para apoyar el desarrollo económico y social (Duailibe Ribeiro et al, 2016).

Con la creciente penetración de la energía eólica y fotovoltaica en la generación de energía y otras tecnologías renovables, la generación distribuida se ha convertido en un tema actual de investigación (Liu K et al, 2015). Para quienes forman parte en los procesos de toma de decisiones, hay una gran cantidad de retos en esta línea ya que existen muchos objetivos y limitaciones que son factores necesarios para obtener resultados. Los niveles de optimización cada vez mayores requieren herramientas robustas y métodos que permitan evaluar la capacidad y las necesidades del sistema de generación con el fin de producir la mejor estrategia de planificación.

Los sistemas de generación distribuida basados en energías renovables se han incrementado drásticamente hasta alcanzar el 12,5% a nivel mundial (Sharique Jamil M; and Anees A, 2016). Por tanto, la generación distribuida basada en energías renovables está jugando un papel importante en el sistema de distribución. A medida que la penetración del sistema de distribución es cada vez mayor, aumenta el interés de todos los actores involucrados para asignar un sistema basado en energías renovables con beneficios económicos, técnicos, sociales y ambientales.

2. Objetivos

El tamaño óptimo de una instalación juega un papel primordial en la mejora de la estabilidad, la fiabilidad y el rendimiento del sistema de distribución y por lo tanto la identificación de emplazamientos adecuados es de gran importancia desde el punto de vista de la incorporación de energía alternativa en el sistema de distribución existente (Rao Gampa S and Das D, 2015).

En este contexto este artículo presenta los criterios más importantes que un sin número de publicaciones científicas han considerado a la hora de obtener el tamaño óptimo de las plantas solares fotovoltaicas teniendo en cuenta todos los factores del sistema de distribución.

Al abordar este problema, presentamos una revisión crítica que establece el dimensionamiento óptimo de uno o varios sistemas fotovoltaicos en un gigavatio (1 GW) de potencia instalada, mediante tecnología solar fotovoltaica, para obtener un sistema de distribución con el menor impacto ambiental y al menor coste posible.

A partir de la clasificación de la generación distribuida se proponen dos grandes grupos de alternativas pequeña/mediana y grande/muy grandes para la instalación de 1GW de potencia mediante energía fotovoltaica. Asimismo, se definen los indicadores que representan todos los criterios que afectan a la funcionalidad del sistema en términos técnicos, económicos, medioambientales y sociales.

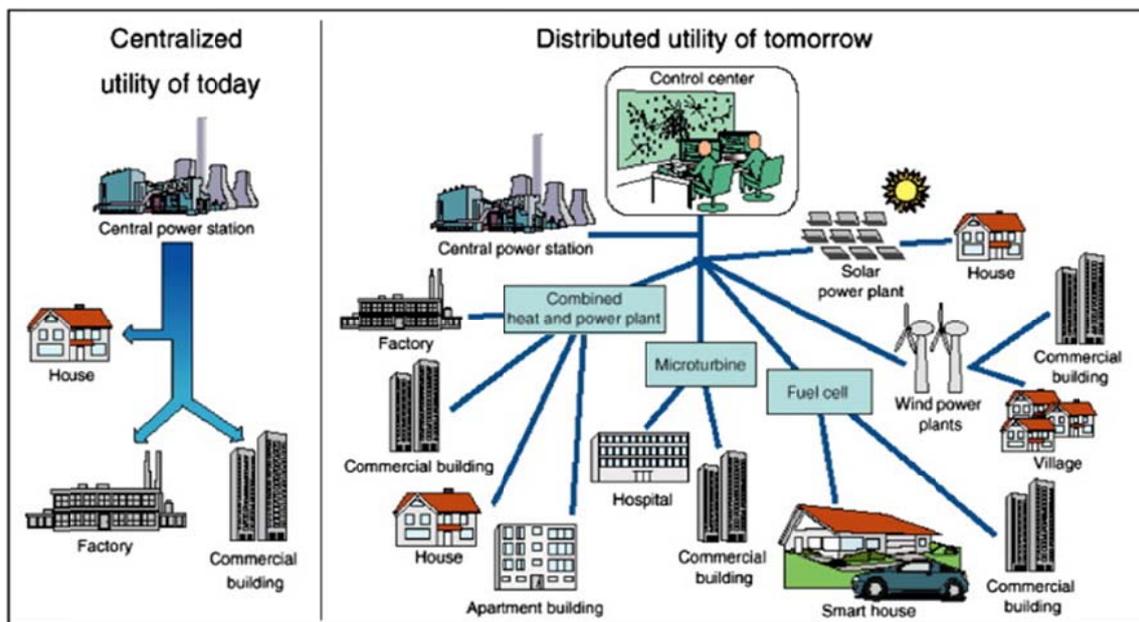
Este trabajo se estructura de la forma siguiente: en el epígrafe 3 se muestra la situación actual de la generación distribuida en las energías renovables. La energía distribuida solar fotovoltaica junto a las diferentes clasificaciones del tamaño de las plantas se presenta en el epígrafe 4. En el epígrafe 5 se describen los criterios y se definen los principales indicadores para obtener el tamaño ideal de las plantas fotovoltaicas. Finalmente el epígrafe 6 muestra las conclusiones y líneas futuras a tener en cuenta para obtener el dimensionamiento óptimo.

3. Sistemas de Generación Distribuida

La generación distribuida es cualquier fuente de energía eléctrica de capacidad limitada, conectada directamente a la red donde la energía es consumida por los usuarios finales. Ésta puede conectarse directamente a la red de distribución o bien al propio contador del usuario (Ackermann et al, 2001).

El Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE) define la generación distribuida, como las unidades de generación con una capacidad máxima de pocos kW a 100 MW, que por lo general están conectados a la red de distribución y que no son diseñados centralmente (Prakash P and Khatod D. K, 2016).

Figura 1: Definición grafica del Sistema de Generación Distribuida. Fuente: (Viral R and Khatod D.K, 2012)



El objetivo principal de la red de distribución es proporcionar un servicio fiable y eficiente para los consumidores al tiempo que garantiza que los niveles de tensión y la calidad del suministro estén dentro de los parámetros normales (Bagheri A et al, 2015). Tradicionalmente, este objetivo se logra mediante el refuerzo de las líneas y subestaciones existentes, o mediante la instalación de otros nuevos sistemas de generación distribuida.

Recientemente, la energía distribuida ha aumentado considerablemente. Este incremento está motivado por algunos factores tales como las preocupaciones ambientales, la reestructuración de los mercados eléctricos, y la evolución de las tecnologías de generación de energía a pequeña escala (Esmaeili M et al, 2016).

Las principales razones por la que se ha extendido el uso de este tipo de sistema son (Viral R and Khatod D.K, 2012):

1. Están más cerca de los clientes de manera que los costos de transmisión y distribución son evitados o reducidos.
2. Es más fácil encontrar sitios para pequeños generadores.
3. Por lo general, las plantas requieren tiempos de instalación más cortos y el riesgo de inversión no es tan alto.
4. Las plantas presentan eficiencias medias especialmente en la cogeneración y en ciclos combinados.
5. La liberalización del mercado de la electricidad contribuye a la creación de oportunidades para nuevas empresas de servicios públicos en el sector de generación de energía.
6. Proporciona una forma flexible para elegir una amplia gama de combinaciones de coste y fiabilidad.

Las diferentes tecnologías adoptadas en la generación distribuida comprenden pequeñas turbinas de gas, microturbinas, pilas de combustible, energía eólica, energía solar, biomasa, pequeña energía hidroeléctrica, etc. Se puede utilizar de forma aislada, suministro de la demanda local del consumidor, o de forma integrada, suministro de energía para el resto del sistema eléctrico.

La energía distribuida se lleva a cabo en dos niveles (Viral R and Khatod D.K, 2012): el nivel local y el nivel de punto final. Plantas de generación de energía a nivel local a menudo incluyen tecnologías de energía renovable que son específicas del lugar, tales como turbinas eólicas, producción de energía geotérmica, sistemas solares fotovoltaicos y algunas plantas hidro-térmicas.

La generación renovable siempre ha sido una alternativa atractiva para las zonas rurales donde los costos de transmisión y distribución son elevados. El sistema se está convirtiendo rápidamente en una opción interesante en las regiones con mayor densidad de población. (Viral R and Khatod D.K, 2012).

Las tecnologías renovables tienden a ser más pequeñas y menos centralizadas que las plantas tradicionales. También producen con frecuencia más energía y el coste económico es menor. Expertos en medioambiente sugieren que las tecnologías renovables pueden proporcionar ahorros económicos adicionales para la sociedad en comparación con las grandes centrales eléctricas.

Por otra parte, estudios recientes han confirmado que el uso generalizado de las tecnologías de la generación renovable distribuida reducen sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero: un reciente estudio en el Reino Unido indica que las tecnologías de cogeneración domésticas reducen las emisiones de dióxido de carbono en un 41% (Viral R and Khatod D.K, 2012).

Desde el punto de vista de la planificación, el sistema de distribución tiene los siguientes beneficios (Viral R and Khatod D.K, 2012):

- Plazo de ejecución corto y de bajo riesgo de la inversión.
- Un tamaño pequeño que se puede instalar en los centros de carga y no necesita la aprobación del gobierno o buscar territorio útil y disponibilidad de suelo.

- Existencia de una amplia gama de tecnologías de la generación distribuida renovable.
- Mejora la continuidad y la fiabilidad solucionando problemas en la calidad eléctrica.
- Aumenta la eficiencia energética global y mejora el perfil de tensión.
- Reducción en los costes de operación y mantenimiento de algunas tecnologías.
- Menores costes de operación debido a la neutralización de picos de tensión.
- Ayuda a aumentar la diversidad en la fuente de energía.

Sin embargo, la generación distribuida también presenta los siguientes problemas (Viral R and Khatod D.K, 2012):

- Aumento de las corrientes de defecto dependiendo de la ubicación del sistema.
- Alto coste de generación renovable fotovoltaica distribuida debido a que este tipo de tecnologías no han alcanzado su curva de madurez.
- Mal funcionamiento de los circuitos de protección debido al flujo de potencia inverso como resultado de la conexión de la generación distribuida al sistema.
- Algunas tecnologías de generación distribuida como por ejemplo los generadores asíncronos no proporcionan la potencia reactiva a la red.
- La generación distribuida cambia el perfil de tensiones de la red de distribución, debido a la variación de las magnitudes de flujo de potencia.
- El aumento en la cantidad de generación distribuida afecta a la frecuencia y complica el proceso de control del sistema.

4. Energía Distribuida Solar Fotovoltaica

Las tecnologías de generación se pueden dividir en convencionales y no convencionales. Las primeras incluyen a las turbinas de gas, motores de combustión interna y microturbinas de gas. Las segundas se refieren a las energías renovables distribuidas, como la minihidráulica, eólica, pila de combustible y la solar fotovoltaica. Actualmente, la energía solar fotovoltaica y la eólica son los recursos alternativos energéticos más importantes (Tégania I et al, 2014).

Las Instalaciones Solares Fotovoltaicas (ISF) están enmarcadas dentro de las tecnologías de generación distribuida renovable. El apoyo público en mercados crecientes a estas tecnologías ha dado lugar a amplias aplicaciones de la energía fotovoltaica conectada a la red, en particular en las proximidades del consumidor y la distribución de electricidad (Paatero J. V and Lund P. D, 2007).

La preocupación de aumentar la penetración de las energías renovables en la red junto con la reducción de los precios de los paneles solares fotovoltaicos durante las últimas décadas ha permitido la implantación de centrales de energía solar fotovoltaica (Cabrera-Tobar A et al, 2016).

Además, el carácter modular de la tecnología fotovoltaica permite, al contrario que en la mayoría de las fuentes convencionales, un costo unitario y una eficiencia independiente del tamaño o la escala de la instalación; por esta razón, la energía distribuida fotovoltaica presentan un gran interés para la producción de energía descentralizada.

Hoy en día, el número de plantas fotovoltaicas medianas y grandes está aumentando significativamente y la necesidad de una gestión y aprovechamiento de la energía óptima de tales plantas es de gran importancia (Ventura C and Marco Tina G. 2016). Estas Instalaciones fotovoltaicas altamente distribuidas dentro de los entornos de la ciudad, como en las cubiertas de edificios y fachadas, permiten localizar la generación de electricidad muy próxima al usuario final, minimizando la necesidad de modificaciones en la red de distribución y reduciendo al mínimo las pérdidas de transmisión (Jacques D. A et al, 2014).

4.1. Clasificación del Tamaño de la Energía Distribuida Solar Fotovoltaica

Los parámetros de tamaño de la generación distribuida tienen que ser determinados cuidadosamente para mejorar el rendimiento y la eficiencia general del sistema fotovoltaico. Por lo tanto, el tamaño adecuado de una instalación de energía distribuida es muy importante para el funcionamiento fiable y para satisfacer la demanda de los consumidores.

La forma de clasificar el tamaño es un aspecto que debe ser considerado en detalle a la hora de determinar el tamaño óptimo de una instalación fotovoltaica de generación distribuida.

Estas instalaciones se clasifican en plantas pequeñas y medianas (menos de 1 MW de potencia, y entre 1 y 5 MW respectivamente) y de un tamaño más grande las que excedan de 5 MW. Las primeras son instaladas normalmente en viviendas y edificios mientras que las de gran tamaño tales como los huertos solares, son implantados en zonas principalmente agrícolas (Prados M. J. 2010).

En función de la potencia, se puede clasificar la generación fotovoltaica en cuatro tipos de instalaciones de acuerdo a su tipología correspondiente (Mateu Carlos, 2012):

- Instalaciones pequeñas de 3 kW como planta tipo (con rango de hasta 5 kW): Son normalmente aplicaciones sobre cubiertas, tejados, azoteas de viviendas unifamiliares, llevadas a cabo por particulares en zonas de su propiedad; la motivación es generalmente medioambiental. Con la generación de 3 kW se cubre el consumo propio de una casa tipo medio, en el que viven 2-3 personas, excluyendo el consumo de calefacción y aire acondicionado.
- Instalaciones medianas de 15 kW como planta tipo (con rango entre 5 y 20 kW): Son instalaciones en edificios o naves industriales, normalmente, integrados en la arquitectura de los mismos. Una instalación de 15 kW en un edificio supone cubrir las necesidades eléctricas de 5 viviendas medias.
- Instalaciones grandes de 100 kW como planta tipo (con rango entre 20 kW y 100 kW): Son, generalmente, instalaciones de superficies grandes, promovidas por empresas que, además de contribuir a una generación limpia, desean un refuerzo de la imagen de la empresa o entidad promotora. Una planta de 100 kW cubre el consumo de un edificio de tipo medio.
- Centrales FV de 3 MW como planta tipo (con rango superior a 100 kW): Son centrales de generación promovidas, generalmente, por empresas o consorcios de empresas, siendo una de ellas la empresa local de distribución, normalmente. Estas empresas desean conseguir un rendimiento económico y una componente de generación verde. Una planta de 3 MW cubre el consumo de una población o urbanización de, aproximadamente, 500 vecinos.

En lo que respecta a la clasificación de las unidades de generación distribuida por orden de la potencia instalada, las investigaciones científicas utilizan actualmente muchas definiciones como por ejemplo (Ackermann et al, 2001):

1. El Instituto de Investigación de Energía Eléctrica define la generación distribuida como la generación de "unos pocos kilovatios hasta 50 MW.
2. De acuerdo con el Instituto de Investigación del Gas, la generación distribuida es "típicamente entre 5 y 25 MW.
3. Preston y Rastler definen el tamaño como "que van desde unos pocos kilovatios hasta más de 100 MW".

4. Cardell define como la generación distribuida la escala entre 500 kW y 1 MW.
5. La Conferencia Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos de Alta Tensión (CIGRÉ) define la generación distribuida como menor de 50-100 MW.

Entre todos estos estudios encontramos diferentes clasificaciones pero las siguientes tres plantean características similares:

El tamaño de las instalaciones fotovoltaicas según la potencia se puede clasificar en:

1- Sistemas Individuales o Centrales Eléctricas (Duailibe Ribeiro et al, 2016): los sistemas individuales son los que tienen un tamaño de unidad de potencia (o capacidad de generación) del orden de los kW y las centrales eléctricas son las instalaciones fotovoltaicas que tienen una unidad de potencia en torno a los MW.

2- Sistemas Fovovoltaicos a gran escala o Sistemas Fovovoltaicos a pequeña escala (Lv T and Ai Q, 2016): se consideran sistemas fovovoltaicos de gran escala las plantas solares mayores de 500 kW y se considera sistemas fovovoltaicos de pequeña escala las instalaciones solares mayores de 3 kW y menores de 500 kW.

3- Se clasifica en términos de la generación distribuida (tabla 1).

Tabla (1). Clasificación de la generación distribuida. (Fuente: Viral R and Khatod D.K, 2012)

	Categorías	Potencia
Pequeña y Mediana generación distribuida	generación micro-distribuida	~ 1 W <5 kW
	generación distribuida Pequeña	5 kW <5 MW
Grande y Muy grande generación distribuida	generación distribuida media	5 MW <50 MW
	ampliación de la generación distribuida	50 MW <300 MW

Estas tres clasificaciones establecen la dimensión del sistema de distribución de las instalaciones solares fotovoltaicas a partir de la potencia instalada.

4.2. Tamaño Óptimo de las Instalaciones Solares Fovovoltaicas

Actualmente los sistemas fovovoltaicos a gran escala (> 500 kW) presentan una menor proporción de la producción de energía fovovoltaica en comparación con los sistemas de pequeña escala (<3 kW). Sin embargo, el mercado está mostrando un dramático aumento en el número de instalaciones a gran escala. En Francia se observó un aumento del 90% entre los trimestres 2º y 1º de 2010 para instalaciones de potencia superior a 500 kW, en comparación con un aumento del 38% para instalaciones de pequeña escala (Beylot A et al, 2014).

En este contexto y debido al rápido desarrollo de la generación distribuida, el tamaño óptimo de los sistemas fovovoltaicos está siendo intensamente abordado y discutido. Las instalaciones fovovoltaicas con un dimensionamiento no óptimo pueden dar lugar a diversos problemas tales como un incremento en las pérdidas del sistema, aumento de tensión, fluctuaciones y problemas de estabilidad (Viral R and Khatod D.K, 2012).

Por lo tanto, es necesario desarrollar una metodología para optimizar e identificar la dimensión óptima de un sistema de distribución renovable que pueda proporcionar ventajas económicas, medioambientales y técnicas.

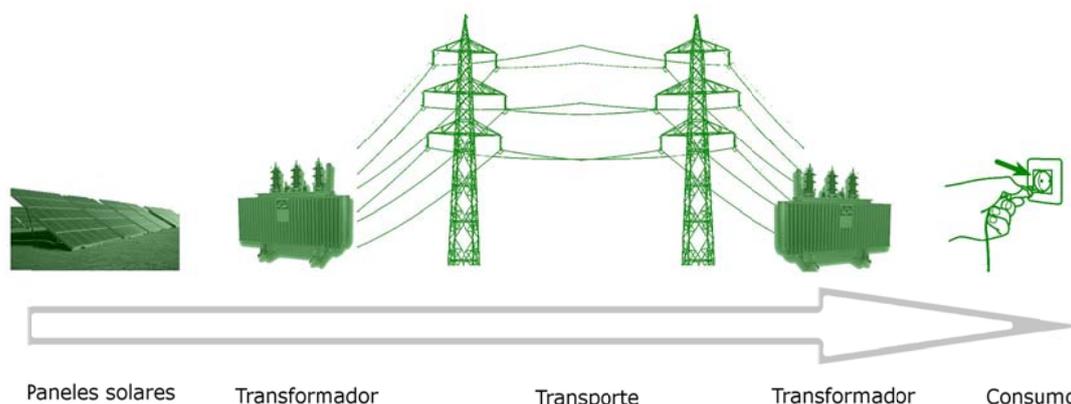
Hasta ahora, la mayoría de los estudios del tamaño óptimo se han centrado en tecnologías de instalaciones a pequeña escala es decir, las que van desde las cubiertas solares hasta el consumidor o usuario final (figura 2).

Figura 2: Esquema de Instalaciones de cubiertas solar hasta el consumidor Fuente: (Narejos A, 2012)



Pero estudios recientes subrayan que las grandes centrales solares o instalaciones a gran escala) (figura 3) son las más recomendables. Destacando que con ellas las necesidades de suministros están cubiertas y que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero de forma considerable.

Figura 3: Esquema de Instalaciones desde Huerto Solar hasta el Consumidor. (Fuente: Narejos A, 2012)



Ejemplos de diferentes publicaciones que destacan esto último mencionado se presentan a continuación (tabla 2). En esta tabla se muestran diferentes estudios en los que se ha abordado la importancia de obtener el tamaño óptimo de las instalaciones fotovoltaicas con generación distribuida y la diversidad de parámetros que se deben tomar en cuenta a la hora de establecerlo:

Tabla 2: Publicaciones que se enfocan en el tamaño óptimo de los sistemas con generación distribuida (Fuente: Elaboración Propia)

Autor	Año	Nacionalidad	Revista	Título del Artículo
Tianguang L; Qian A	2016	Shangai, China	Applied Energy	Interactive energy management of networked microgrids-based active distribution system considering large-scale integration of renewable energy resources
Ke-yan Liua, Wanxing Shenga, Yuan Liub, Xiaoli Menga, Yongmei Liua	2015	Beijing, China	International Journal of Electrical Power & Energy Systems	Optimal sitting and sizing of DGs in distribution system considering time sequence characteristics of loads and DGs
Srinivasa Rao Gampa, D. Das	2014	Singapur, India	International Journal of Electrical Power & Energy Systems	Optimum placement and sizing of DGs considering average hourly variations of load

J.K. Kaldellisa, D. Zafirakisa, E. Kondilib	2010	Atenas; Grecia	International Journal of Electrical Power & Energy Systems	Optimum sizing of photovoltaic-energy storage systems for autonomous small islands
Majid Jamil, Ahmed Sharique Anees	2016	Islamia , New Delhi	Energy	Optimal sizing and location of SPV (solar photovoltaic) based MLDG (multiple location distributed generator) in distribution system for loss reduction, voltage profile improvement with economic benefits
Jukka V. Paatero, Peter D. Lund	2007	Helsinki, Finland	Renewable Energy	Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks
Susanne Hangera, b, Nadejda Komendantovaa, b, Boris Schinkec, Driss Zejlid, e, Ahmed Ihlalf, Anthony Patta, b	2016	Zürich, Switzerland	Energy Research & Social Science	Community acceptance of large-scale solar energy installations in developing countries: Evidence from Morocco
J. Arán Carrión, A. Espín Estrella, F. Aznar Dols, A. Ramos Ridaó	2008	Granada; España	Renewable Energy	The electricity production capacity of photovoltaic power plants and the selection of solar energy sites in Andalusia (Spain)
Eloy Díaz-Dorado, Andrés Suárez-García, Camilo J. Carrillo, José Cidrás	2011	Vigo; España	Renewable Energy	Optimal distribution for photovoltaic solar trackers to minimize power losses caused by shadows
Jason Phillips	2013	United Kingdom	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Determining the sustainability of large-scale photovoltaic solar power plants
Prem Prakash, Dheeraj K. Khatod	2016	Uttarakhand, India	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: A review

A partir de la revisión exhaustiva realizada vemos que la comunidad científica de la generación distribuida renovable propone dos grandes esquemas de sistemas fotovoltaico para la generación distribuida las pequeña/mediana (figura 2) y las grandes/ muy grandes (figura 3).

En ninguno de los casos mencionados se sobrepasa el GW de energía distribuida entre sus definiciones del tamaño óptimo. Es por esto que se entiende por óptimo el tamaño de uno o varios sistemas que garanticen la capacidad de 1GW, que maximicen los beneficios socio-económicos y minimicen el impacto ambiental del sistema distribuido.

5. Criterios a considerar para el Tamaño Óptimo en Energía Distribuida Fotovoltaica

A continuación se presenta una recopilación de los parámetros claves que expone la comunidad científica para determinar el tamaño óptimo de las instalaciones fotovoltaicas conectadas mediante generación distribuida (tabla 3). En primer lugar se han establecido cuatro grandes grupos de criterios. Estos cuatro grupos principales son los criterios: técnicos, económicos, medioambientales y sociales.

Tabla 3: Criterios y sub-criterios utilizados en el sistema de generación distribuida fotovoltaico (Fuente: Elaboración Propia)

Técnicos	Económicos	Medioambientales	Sociales
Ubicación geográfica del sitio	Costos de Operación	Impacto Ambiental	Empleo Generado
Recurso Solar disponible	Coste de inversión	Restricciones Naturales en la topografía del terreno	Fomento del Ahorro energético y Conciencia hacia problemas ambientales
Índice de pérdida de potencia por degradación de los módulos	Coste de Mantenimiento	Reducción de Gases de efectos Invernadero y otros gases	Aceptación de la comunidad y Equidad Percibida
Sobretensión	Tasa Interna de Retorno TIR	Reciclado al final de la vida útil	Percepción de la información
Limitaciones técnicas y operacionales	Barreras de la financiación	Condiciones de Viento	Impactos Sociopolíticos
Líneas de transmisión adicionales	Coste de Electricidad Suministrado por la red	Disponibilidad de la superficie	Mitigación de la Pobreza y reducción de las desigualdades
Perdidas de Trasmisión y distribución de transporte	Posibles Ayudas y desgravaciones fiscales	Entorno	Marco Normativo
Superficie del área	Ingresos adicionales por posible reducción de emisiones	Impactos sobre el ecosistema	Desarrollo de la Infraestructura Local
Fiabilidad del sistema	Barreras en la contratación	La pérdida de tierras cultivables	Utilización de la energía
Performance Ratio	Ahorros en las pérdidas de transmisión		Producción de bienes y servicios
Degradación del Sistema	Valor Agregado Neto VAN		Desarrollo Económico
Angulo de Inclinación	Precio del Suelo		Capacidad de Suministros en mercados locales
Interrupciones en el vertido			Distancia del Proyecto de la Población
Orientación del lugar			Percepción Social Negativa de Impactos Añadidos
Distancia de las líneas eléctricas			Tejido Industrial de la zona
Facilidades de conexión			
Topología de la red de distribución y condiciones de las líneas y subestaciones			
Flujo de Potencia			
Desperdicio de energía			
Eficiencia de Conversión Eléctrica			
Perturbaciones en la red			
Elementos de seguridad del sistema			
Distancia a Subestaciones de transformación			

	Sub-criterio para tamaño pequeño y mediano
	Sub-criterio para tamaño grande y muy grande
	Sub-criterio para ambos tamaños

Si vemos la tabla 3 nos damos cuenta que los grupos de criterios que mas parámetros citados tienen son los técnicos seguido de los criterios sociales, en tercer lugar están los económicos y finalmente los medioambientales. Los dos sub-criterios mayormente citados por las revistas científicas son: sobretensión e impacto ambiental.

El sub-criterio económico más citado por los científicos es coste de inversión, seguido por coste de operación y tasa interna de retorno TIR. El sub-criterio social mayormente citado es marco normativo seguido por empleo generado y capacidad de suministros en mercados locales.

En cuanto a los sub-criterio técnicos además de la sobretensión, es ampliamente citado el recurso solar disponible seguido de la fiabilidad del sistema. Entre los sub-criterios medioambientales son muy citados reducción de gases de efectos Invernadero, restricciones naturales en la topografía del terreno y el reciclado al final de la vida útil de la instalación.

5.1. Indicadores del Tamaño Óptimo en Energía Distribuida Fotovoltaica

Para establecer la influencia que tienen cada uno los parámetros citados por los científicos hemos agrupado los sub-criterios en indicadores generales de acuerdo a la funcionalidad del sistema. Estos se agrupan en términos técnicos, económicos, medioambientales y sociales (tabla 4).

De esta forma podremos identificar de forma más rápida las ventajas económicas, medioambientales y técnicas que se obtienen a la hora de establecer un dimensionamiento óptimo de las instalaciones fotovoltaicas para los sistemas de generación distribuida.

Cabe destacar que también clasificamos (tabla 4) la forma más conveniente de medir cada uno de estos indicadores ya sea cualitativa o cuantitativamente.

Tabla 4: Indicadores que agrupan los sub-criterios del sistema (Fuente: Elaboración Propia)

Indicadores	Grupo de Criterio	Características de Medida	Sub-Criterios que lo componen
Conexión a la Red	Técnico	Cualitativo	Sobretensión, Líneas de Transmisión adicionales, Pérdidas de Trasmisión y distribución de transporte, Topología de la red de distribución y condiciones de las líneas y subestaciones, Perturbaciones en la red , Distancia a Subestaciones de trasformación
Geocalización		Cualitativo	Ubicación geográfica del sitio, Recurso Solar disponible, Superficie del área, Condiciones del Viento, Performance Ratio, Angulo de Inclinación, Orientación del lugar
Eficiencia de Potencia del Sistema		Cualitativo	Pérdida de potencia de potencia anual por degradación de los módulos, Flujo de Potencia, Eficiencia de Conversión Eléctrica
Funcionabilidad del Sistema		Cualitativo	Limitaciones técnicas y operacionales, Fiabilidad del sistema , Degradación del Sistema , Desperdicio de Energía, Elementos de Seguridad del Sistema
Costes Económicos	Económico	Cuantitativo	Costes de Operación, Coste de Inversión, Costes de Mantenimiento, Coste de electricidad suministrada por la red , Precio del Suelo
Barreras Económicas		Cualitativo	Barreras de la Financiación, Barreras en la contratación
Incentivos y Rentabilidad Económica		Cuantitativo	Posibles Ayudas y desgravaciones fiscales, Ingresos adicionales por posible reducción de emisiones, Tasa Interna de análisis de rentabilidad TIR, Valor Agregado Neto VAN
Impactos Físicos sobre el Terreno	Medioambiental	Cualitativo	Restricciones Naturales en la topografía del terreno, Disponibilidad de la superficie, Pérdida de tierras cultivables
Vabilidad Medioambiental		Cualitativo	Impacto Ambiental, Reducción de Gases de efectos Invernadero y otros gases, Reciclado al final de la vida útil, Impactos sobre el Ecosistema; Restricciones legales de protección ambiental
Empleo Generado	Social	Cuantitativo	Empleo Generado en la fase de construcción, Empleo Generado en la fase de operación, Empleo Generado en la fase de desmantelamiento y reciclado
Marco Normativo		Cualitativo	Marco Normativo
Percepción Sociopolítica de la Población		Cualitativo	Aceptación de la comunidad y Equidad Percibida, Percepción de la información, Impactos Sociopolíticos, Mitigación de la Pobreza y reducción de las desigualdades, Distancia del Proyecto de la Población, Percepción Social Negativa de Impactos Añadidos
Vabilidad Socioeconómica		Cualitativo	Fomento del Ahorro energético y Conciencia hacia problemas ambientales, Desarrollo de la Infraestructura Local, Producción de bienes y servicios, Desarrollo Económico, Tejido Industrial de la Zona
Servicio del Suministro Eléctrico		Cuantitativo	Utilización de la Energía , Capacidad de Suministros en mercados locales , Grado de Satisfacción del Usuario, Cobertura de la demanda
		Cuantitativo	

6. Conclusiones y Línea Futuras de Investigación

A partir de esta revisión bibliográfica se puede destacar que las ventajas económicas de obtener el tamaño óptimo de una instalación fotovoltaica conectada al sistema de generación distribuida son: disminución de los costes económicos, ayuda para superar las barreras económicas y aumento de incentivos y rentabilidad del sistema.

Las ventajas medioambientales son: reducción del impacto físico sobre el terreno y fortalecimiento de la viabilidad medioambiental. En cuanto a las ventajas técnicas podemos destacar mejoras en la funcionabilidad del sistema, mejor desenvolvimiento de la conexión a la red, eficiencia en la potencia del sistema y mayor nitidez en la geocalización de la instalación.

Sin embargo, la escala óptima a instalar sigue siendo un problema sin resolver. Por lo tanto, es necesario desarrollar una metodología para optimizar e identificar la escala óptima del sistema de generación distribuida fotovoltaica que demuestre las ventajas económicas, medioambientales y técnicas mencionadas anteriormente.

Una metodología recomendable por la cantidad de criterios citados por la comunidad científica es aplicar técnicas de toma de decisiones multicriterio donde participen diferentes expertos del sector fotovoltaico y, de esta forma poder involucrar en esta decisión a técnicos, investigadores, la sociedad civil y política. Así, será posible obtener un consenso robusto y fiable respecto a los posibles resultados obtenidos.

Referencias

- Ackermanna T; Andersson G; Södera L. (2001). Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*. Volume 57, Issue 3, 20 April 2001, Pages 195–204.
- Bagheri A, Monsef H; Lesani H. (2015). Integrated distribution network expansion planning incorporating distributed generation considering uncertainties, reliability, and operational conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Volume 73, December 2015, Pages 56–70.
- Beylot A; Payet J; Puech C; Adra N; Jacquin P; Blanc I; Beloin-Saint-Pierre D. (2014). Environmental impacts of large-scale grid-connected ground-mounted PV installations. *Renewable Energy* 61 (2-6).
- Cabrera-Tobar A; Bullich-Massagué E; Aragüés-Peñalba M; Gomis-Bellmunt O. (2016). Topologies for large scale photovoltaic power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 59, June 2016, Pages 309–319.
- Duailibe Ribeiro A.E; Cardoso Arouca M; Moreira Coelho D. (2016). Electric energy generation from small-scale solar and wind power in Brazil: The influence of location, area and shape. *Renewable Energy*. Volume 85, January 2016, Pages 554–563.
- Esmaili M; Sedighzadeh M; Esmaili M. (2016). Multi-objective optimal reconfiguration and DG (Distributed Generation) power allocation in distribution networks using Big Bang-Big Crunch algorithm considering load uncertainty. *Energy*. Volume 103, 15 May 2016, Pages 86–99.
- Jacques D. A; Gooding J; Giesekam J.J, Tomlin A. S; Crook R. (2014). Methodology for the assessment of PV capacity over a city region using low-resolution LiDAR data and application to the City of Leeds (UK). *Applied Energy*. Volume 124, Pages 28–34.
- Jamil M; Sharique Anees A. (2016). Optimal sizing and location of SPV (solar photovoltaic) based MLDG (multiple location distributed generator) in distribution system for loss reduction, voltage profile improvement with economical benefits. *Energy*. Volume 103, 15 May 2016, Pages 231–239.
- Liu K, Sheng W; Liu Y; Meng X; Liu Y. (2015). Optimal sitting and sizing of DGs in distribution system considering time sequence characteristics of loads and DGs. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Volume 69, July 2015, Pages 430–440.
- Lv T; Ai Q. (2016). Interactive energy management of networked microgrids-based active distribution system considering large-scale integration of renewable energy resources. *Applied Energy*. Volume 163, 1 February 2016, Pages 408–422.
- Mateu Carlos. (2012). La Generación Distribuida gracias a la energía solar fotovoltaica. *Suelo Solar New Solar*. 23/07/2012. <http://www.suelosolar.com/newsolares/newsol.asp?id=7095>
- Narejos Antonio. (2012) ¿Interesa comprar un coche eléctrico? *Energías Renovables e instalaciones industriales (fotovoltaica, eólica y eficiencia energética)*. 19/01/2012. <https://antonionarejos.wordpress.com/author/antonionarejos/page/4/>.

- Paatero J. V; Lund P. D. (2007). Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks. *Renewable Energy*. Volume 32, Pages 216–234.
- Prados M. J. (2010). Renewable energy policy and landscape management in Andalusia, Spain: The facts. *Energy Policy*. Volume 38, Issue 11, November 2010, Pages 6900–6909.
- Prakash P, Khatod D. K. (2016). Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 57, May 2016, Pages 111–130.
- Rao Gampa S; Das D. (2015). Optimum placement and sizing of DGs considering average hourly variations of load. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Volume 66, March 2015, Pages 25–40.
- Tégania I; Abouboua A; Ayad M.Y; Becherifc M; Saadia R and Kraaa O. (2014). Optimal sizing design and energy management of stand-alone photovoltaic/wind generator systems. *The International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES14*. *Energy Procedia*. Volume 50, Pages 163 – 170.
- Ventura C; Marco Tina G. (2016). Utility scale photovoltaic plant indices and models for on-line monitoring and fault detection purposes. *Electric Power Systems Research*. Volume 136, July 2016, Pages 43–56.
- Viral R; Khatod D.K. (2012). Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16 (5146-5165).