



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Instituto
Ingeniería
Energética



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE MÁSTER
TECNOLOGÍA ENERGÉTICA PARA DESARROLLO SOSTENIBLE

“DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA AUTOMÁTICA DE OPTIMIZACIÓN DE INSTALACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN CUBIERTAS DE EDIFICIOS”

AUTOR: HERNÁNDEZ FLORES, MIGUEL ÁNGEL

TUTOR: GÓMEZ NAVARRO, TOMÁS

Curso Académico: 2020-21

“Fecha 02/2021”

“Agradezco todo el apoyo que he recibido de la Cátedra de Transición Energética Urbana, a los profesores Tomás Gómez y José Miguel Corberán por sus consejos y amistad. Asimismo, quiero agradecer a mi madre Nancy y a mi pareja Karen por sus palabras y muestras de apoyo a la distancia. Por último, a mis amigos que siempre están ahí sin importar qué. “

RESUMEN

En Valencia, se estima un consumo de 7.094 GWh de electricidad durante el 2017 en el sector de la edificación. De acuerdo a un estudio realizado por la Fundación Las Naves, en Valencia, se tiene una superficie de cubiertas disponible para energía fotovoltaica aproximada de 4.148.273 m². Por ello, se han desarrollado varias metodologías para determinar el potencial fotovoltaico en esas superficies, no obstante, existen muy pocos estudios que involucren la geometría de la cubierta y del panel fotovoltaico a instalar.

En el presente trabajo se desarrolla una herramienta automática de optimización de instalación de paneles FV en las cubiertas de los edificios de la ciudad de Valencia al utilizar un algoritmo de cálculo que emplea las características de los paneles FV, el espacio disponible en la cubierta, así como su orientación.

Los parámetros utilizados en el algoritmo son: anchura y longitud del panel FV (varía de acuerdo a su potencia: 275 W, 330 W y 400 W), colocación del panel FV (acostado sobre su ancho o largo), ángulo de inclinación del panel FV, la longitud y anchura de la superficie rectangular disponible en la cubierta, así como su orientación con respecto al Sur (ángulo medianera).

Para comparar las diferentes configuraciones que se pueden realizar con los distintos paneles FV se desarrollan diferentes relaciones de variación de potencia al cambiar los ángulos de inclinación y de azimut de los paneles. Asimismo, se diseña una herramienta de cálculo de la cantidad de emisiones de CO₂ evitadas al instalar la configuración óptima de paneles FV para una cubierta con ayuda de las herramientas SimaPro y PVGIS.

Finalmente, se investiga la posible relación de la proporción m²/kW_p con las diferentes dimensiones y propiedades de un área rectangular dada ya que dicha proporción es muy utilizada en las primeras etapas de un proyecto fotovoltaico.

Palabras Clave: paneles fotovoltaicos; cubiertas de edificios; optimización; herramienta automática; relaciones de potencia instalada.

RESUM

A València, s'estima un consum de 7.094 GWh d'electricitat durant el 2017 en el sector de l'edificació. D'acord a un estudi realitzat per la Fundació Les Naus, a València, es té una superfície de cobertes disponible per a energia fotovoltaica aproximada de 4.148.273 m². Per això, s'han desenvolupat diverses metodologies per determinar el potencial fotovoltaic en aquestes superfícies, però, hi ha pocs estudis que involucrin la geometria de la coberta i de el panell fotovoltaic a instal·lar.

En el present treball es desenvolupa una eina automàtica d'optimització d'instal·lació de panells FV a les cobertes dels edificis de la ciutat de València a l'utilitzar un algoritme de càlcul que fa servir les característiques dels panells FV, l'espai disponible a la coberta, així com la seva orientació.

Els paràmetres utilitzats en l'algoritme són: amplada i longitud de el panell FV (varia d'acord a la seva potència: 275 W, 330 W i 400 W), col·locació de el panell FV (estirat sobre el seu ample o llarg), angle d'inclinació de el panell FV, la longitud i amplada de la superfície rectangular disponible a la coberta, així com la seva orientació pel que fa a al Sud (angle mitgera).

Per comparar les diferents configuracions que es poden realitzar amb els diferents panells FV es desenvolupen diferents relacions de variació de potència a l'canviar els angles d'inclinació i d'azimut dels panells. Així mateix, es dissenya una eina de càlcul de la quantitat d'emissions de CO₂ evitades a l'instal·lar la configuració òptima de panells FV per una coberta amb ajuda de les eines SimaPro i PVGIS.

Finalment, s'investiga la possible relació de la proporció m² / kWp amb les diferents dimensions i propietats d'una àrea rectangular donada ja que aquesta proporció és molt utilitzada en les primeres etapes d'un projecte fotovoltaic.

Paraules clau: panells fotovoltaics; cobertes d'edificis; optimització; eina automàtica; relacions de potència instal·lada.

ABSTRACT

In Valence, a consumption of 7.094 GWh of electricity was calculated during 2017 in the building sector. According to a study carried out by the Las Naves Foundation, in Valence, there is a rooftop area available for photovoltaic energy of approximately 4.148.273 m². For this reason, several methodologies have been developed to determine the photovoltaic potential on these surfaces; however, there are very few studies that involve the geometry of the rooftop and the photovoltaic panel to be installed.

In this document, an automatic tool for optimizing the installation of PV panels on buildings' rooftops in Valence is developed by using a calculation algorithm that uses the characteristics of the PV panels, the space available on the rooftop, as well as its orientation.

The parameters used in the algorithm are: width and length of the PV panel (varies according to its power: 275 W, 330 W and 400 W), placement of the PV panel (lying on its width or length dimension), angle of inclination (tilt) of the PV panel, the length and width of the rectangular surface available on the rooftop, as well as its orientation with respect to the South (party wall angle).

To compare the different configurations that can be made with the different PV panels, different power variation relationships are developed by changing the tilt and azimuth angles of the panels. Likewise, a tool is designed to calculate the amount of CO₂ emissions avoided when installing the optimal configuration of PV panels on a rooftop with the help of the software SimaPro and PVGIS.

Finally, the possible relationship of the m² / kW_p ratio with the different dimensions and properties of a given rectangular area is investigated since this ratio is widely used in the early stages of a photovoltaic project.

Keywords: photovoltaic panels, buildings' rooftops; optimization; automatic tool; installed power relationships.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Consumo energético en Europa	1
1.1.2. Consumo eléctrico residencial nacional	4
1.1.3. Consumo energético en Valencia	6
1.1.4. Situación actual del sector fotovoltaico	8
1.2. Justificación	13
1.3. Objetivos	14
1.4. Estructura	15
CAPÍTULO 2. Metodología de optimización de paneles fotovoltaicos en cubiertas	17
2.1 Introducción	17
2.2 Arreglos de paneles fotovoltaicos	17
2.2.1 Típicos de paneles fotovoltaicos comerciales a diferentes potencias	17
2.2.2 Bloques de arreglos de paneles fotovoltaicos	20
2.3 Caracterización de superficies	28
2.4 Relaciones de conversión de potencia instalada	30
2.5 Consideración especial a la alineación del arreglo de paneles con el Sur	38
2.6 Metodología para la optimización de paneles fotovoltaicos	40
2.7 Emisión de contaminantes	42
2.7.1 Análisis del ciclo de vida	42
2.7.2 Aplicación	48
2.8 Ejemplo de aplicación	51
CAPÍTULO 3. Proporción m^2/kW_p en cubiertas	59
3.1. Introducción	59
3.2. Metodología	59
3.3. Identificación de patrones	66
CAPÍTULO 4. Conclusiones	75
CAPÍTULO 5. Bibliografía	79
ANEXO A Valores m^2/kW_p	85

MEMORIA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta todo el contexto que rodea a este trabajo. En primer lugar, se describe la evolución del consumo de energía primaria y final, así como la participación de las energías renovables en el consumo de energía final y la intensidad de gases de efecto invernadero en España y Europa durante los últimos años y la respuesta de la Unión Europea ante estos datos.

Posteriormente, se describe el consumo energético residencial nacional, los fines de uso que se le da a la electricidad en los hogares y el consumo eléctrico promedio por tipo de vivienda y zona geográfica. Asimismo, se da conocer el consumo energético en Valencia, que es el lugar elegido de aplicación de este trabajo, y el plan de transición energética PACES.

En este bloque también se describe la normativa pertinente de los últimos años que tiene inherencia sobre el sector fotovoltaico, así como el estado actual de este sector a nivel nacional. Para finalizar el contexto de este trabajo se menciona la evolución de costes de la tecnología fotovoltaica.

Una vez establecido el contexto, se procede a mencionar los objetivos de este documento, su justificación y la estructura del mismo para proporcionar una guía al lector.

1.1. ANTECEDENTES

1.1.1. CONSUMO ENERGÉTICO EN EUROPA

Desde el año 2000, el consumo de energía primaria per cápita ha sufrido un decrecimiento desde valores de 3,40 toe/cápita hasta 3 toe/cápita en la Unión Europea, en el caso de España, la reducción ha sido desde 2,80 toe/cápita hasta 2,60 toe/cápita con un pico alto intermedio en el 2005 con 3,10 toe/cápita y uno bajo intermedio en el 2014 con 2,40 toe/cápita (1).

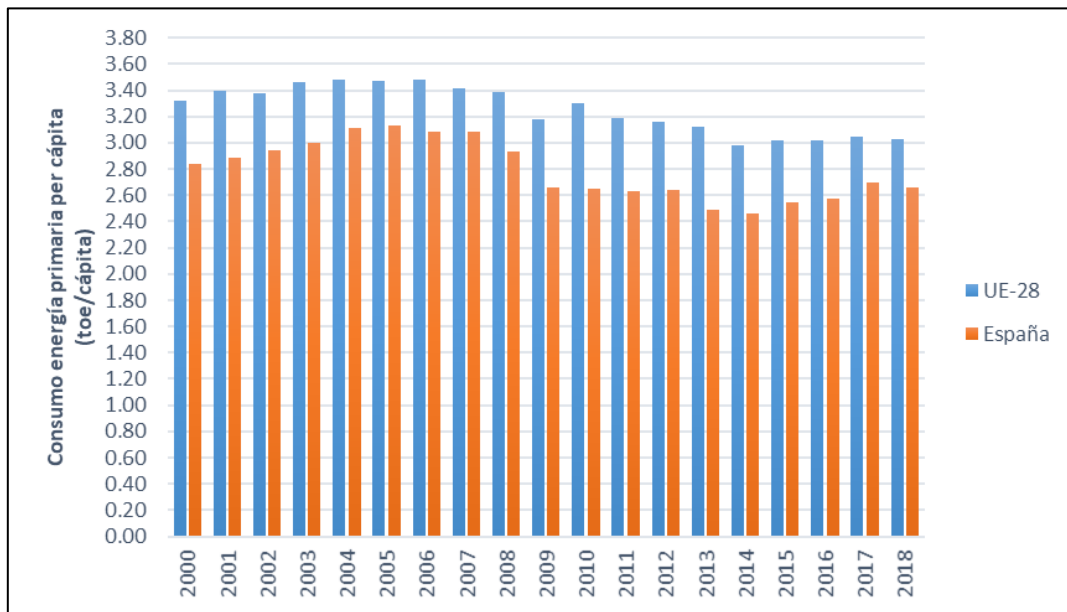


Figura 1. Consumo de energía primaria per cápita para UE y España (1).

Durante los últimos 20 años el consumo de energía final per cápita en la Unión Europea ha disminuido desde un valor de 2,40 toe/capita hasta un valor de 2,20 toe/capita. En España, este valor disminuyó del 2005 (2,20 toe/capita) hasta un valor de 1,80 toe/capita en el 2018 (2).

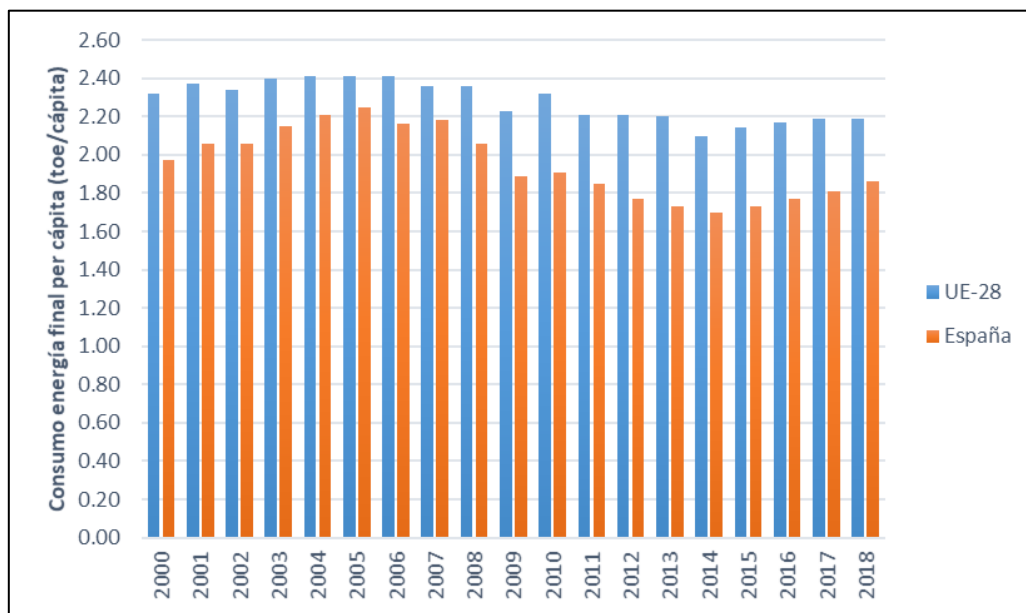


Figura 2. Consumo de energía final per cápita para UE y España (2).

Por otro lado, la participación de la energía renovable en el consumo bruto de energía final ha tenido un incremento considerable tanto en la Unión Europea como en España, desde un 8 % a finales del 2004 hasta el 16% en el 2018 (3).

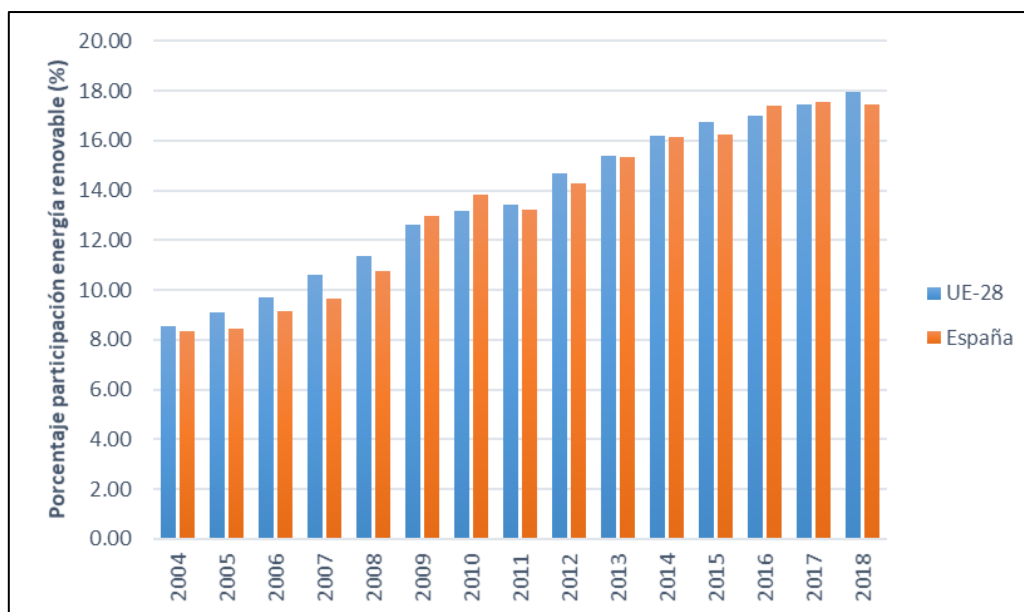


Figura 3. Porcentaje de participación de la energía renovable en consumo bruto de energía final para UE y España (3).

La intensidad de emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de energía final consumida ha disminuido en la Unión Europea, aunque no a una tasa deseada, mientras que, en España, la reducción ha sido mucho menor. Esto da indicios que existe una gran oportunidad para la implementación de las energías renovables en la sociedad española (4).

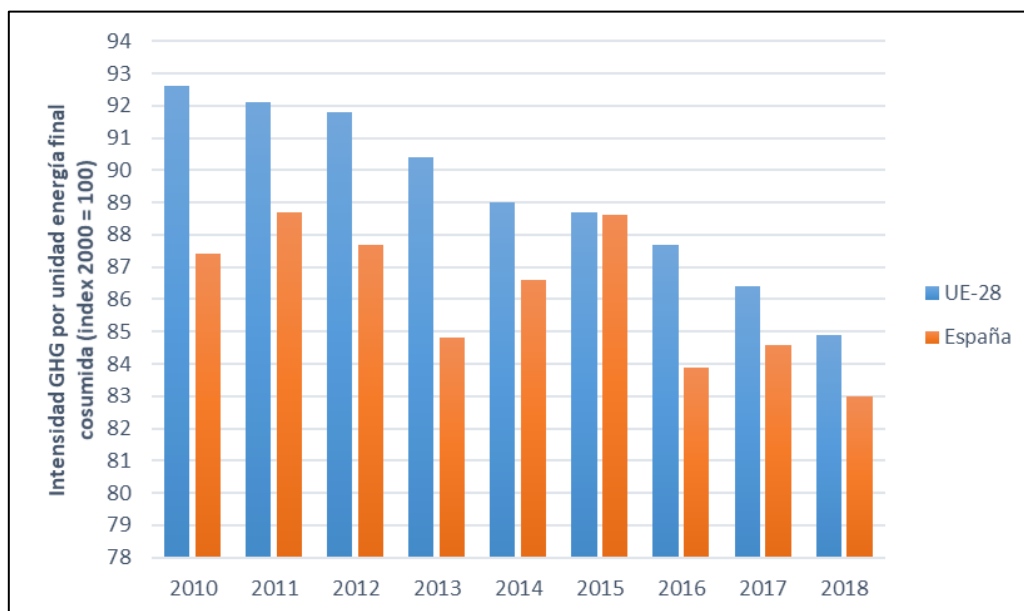


Figura 4. Intensidad GHG por unidad de energía final consumida (índice 2000 = 100) para UE y España (4).

Ante estos datos, la Unión Europea ha decretado en septiembre del 2020 ciertos cambios a los objetivos del Plan Energético del 2030, los cuales son (5):

- Reducir un 40% las emisiones de efecto invernadero (niveles 1990).
- Una participación de 32% de la energía renovable.
- Un incremento del 32,5 % en la eficiencia energética.

Estos nuevos objetivos ejercen mayor presión a las naciones miembro a buscar áreas de oportunidad, desarrollar e implementar tecnologías de energía renovable en los diferentes sectores de su sociedad: industria, transporte, residencia, servicios, agricultura, etc.

Con el fin de tener una mejor perspectiva del consumo de energía final, se puede clasificar por sectores: residencial, transporte, comercial, servicios, administraciones públicas entre otros. Una sección más grande, el de la edificación, está constituido por los sectores residencial, comercial, servicios y administraciones públicas, representa el 41 % del consumo de energía final para la Unión Europea y el 32 % para España en el 2018 (6). Por ende, la edificación presenta un área de oportunidad de mejora de eficiencia y recursos energéticos.

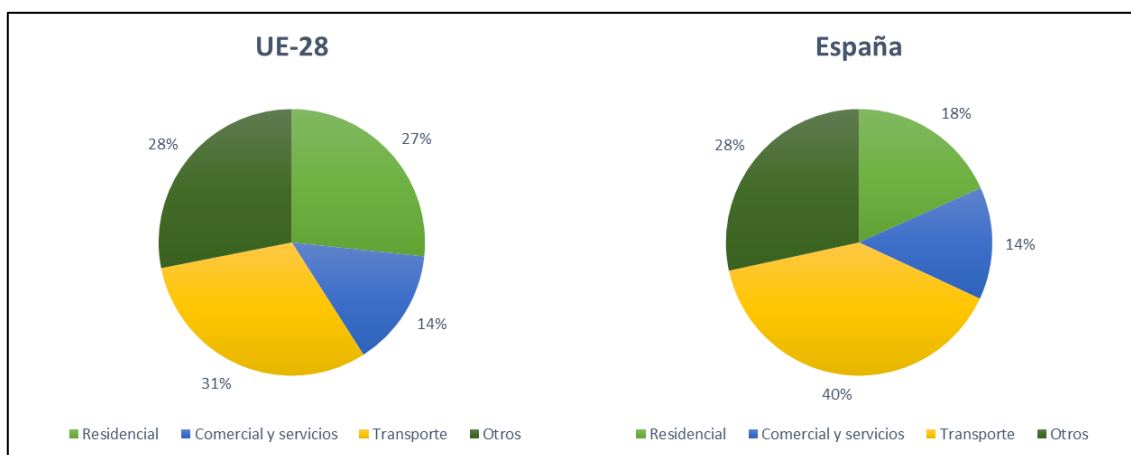


Figura 5. Consumo de energía final por sectores para UE y España 2018 (6).

1.1.2. CONSUMO ELÉCTRICO RESIDENCIAL NACIONAL

En el sector residencial nacional, aproximadamente el 43% de la energía consumida corresponde a la electricidad que puede ser suministrado por el uso de distintas energías renovables, particularmente la tecnología fotovoltaica (7). Por lo tanto, la implementación de la tecnología renovable promueve el cumplimiento con los nuevos objetivos establecidos por la Unión Europea.

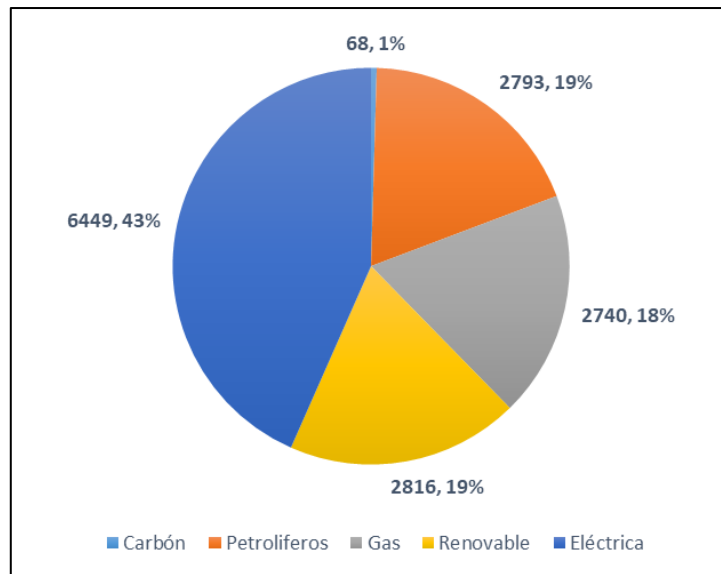


Figura 6. Consumo energético en el sector residencial en 2018 (ktoe) (7).

En particular, de acuerdo al informe del IDAE (8), en el 2018, se estima que un 74 % del consumo de energía eléctrica corresponde a iluminación y electrodomésticos, un 9% a cocina, un 9% a sistemas de calefacción y refrigeración, y un 8% a agua caliente sanitaria.

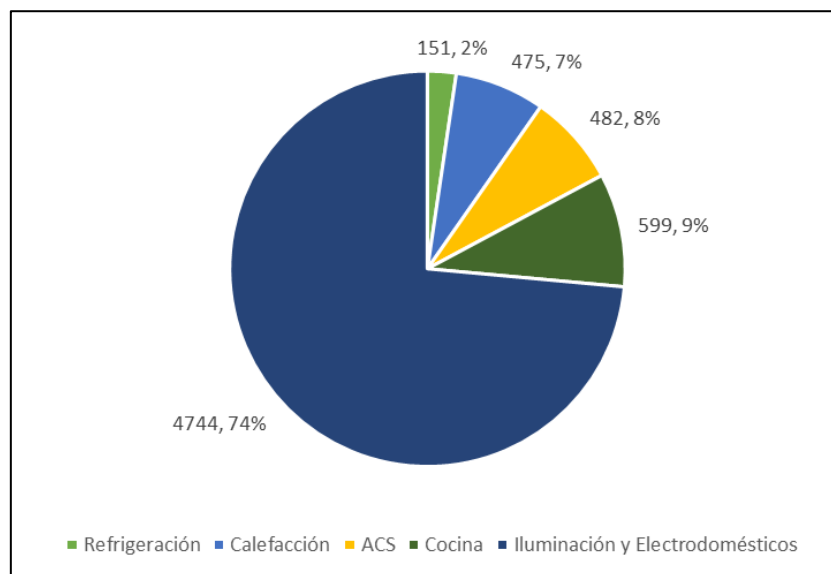


Figura 7. Consumo energía eléctrica en el sector residencial nacional en 2018 (ktoe) (8).

Por la tipología de vivienda, el reporte del proyecto SECH-SPAHOUSEC del IDAE (9) estima que la vivienda unifamiliar consume un poco más del doble que la vivienda en bloque independientemente de la zona climática en que se encuentre, principalmente por la demanda superior de calefacción. No obstante, en cuestión de energía eléctrica, la diferencia es mucho menor y prácticamente igual para cualquier zona climática. En general, las unifamiliares consumen unos 500 kWh/año más que los hogares en bloque, generalmente por una mayor presencia de electrodomésticos y uso de cocina.

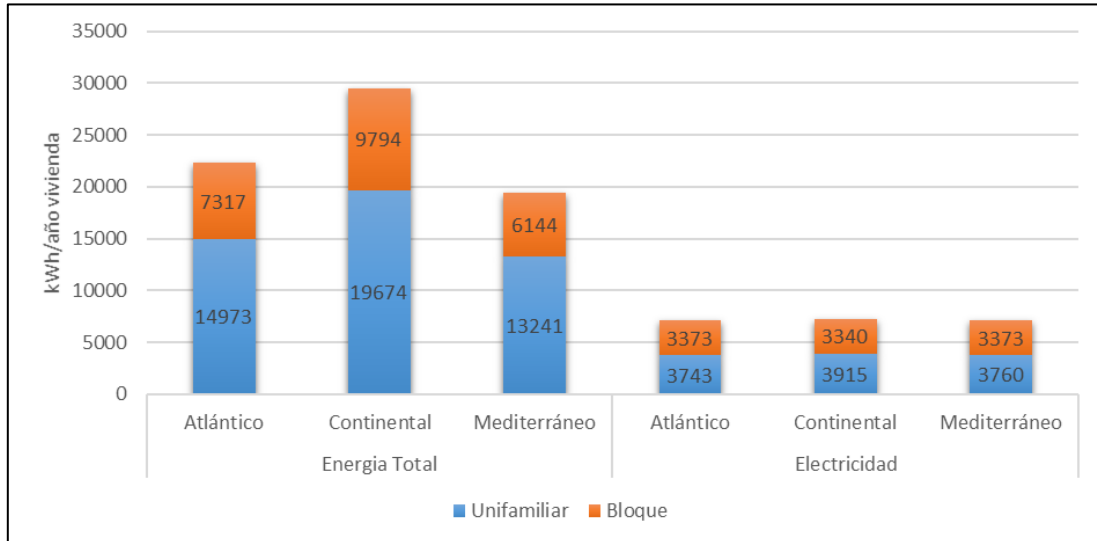


Figura 8. Consumo energético y eléctrico por tipo de vivienda y zona climática (9).

1.1.3. CONSUMO ENERGÉTICO EN VALENCIA

En el 2017, el consumo de energía final de la Comunidad Valenciana fue 8.267 ktoe, y constituyó el 9,3% de la energía final consumida en España. Dentro de la Comunidad Valenciana, los productos petrolíferos representaron el 45,5% del consumo total, el gas natural 24,2%, la electricidad 25% y las energías renovables el 5,3% (10).

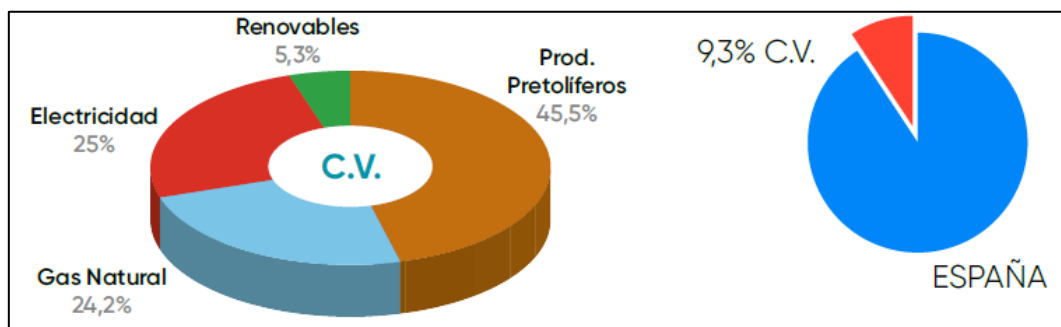


Figura 9. Consumo de energía final en la Comunidad Valenciana 2017 (10).

Particularmente, para la provincia de Valencia se tiene un consumo final de 3.708 ktoe, de los cuales 52,1% corresponden a petróleo, el 26,4% a electricidad y 7,4% a energías renovables (10).

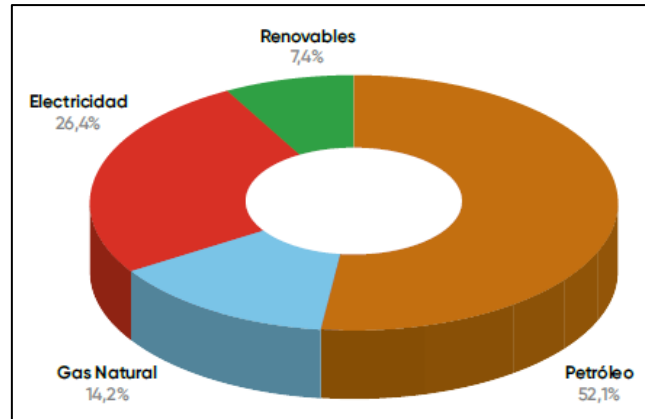


Figura 10. Consumo de energía final en Valencia 2017 (10).

En el consumo de energía eléctrica en Valencia, de los 979 ktoe, el sector residencial representa el 30 %, el sector servicios 32 % del total y el transporte 7 %. La sección de la edificación constituye el 62 % del consumo de energía eléctrica, lo cual es igual a 610 ktoe (7.094,3 GWh).

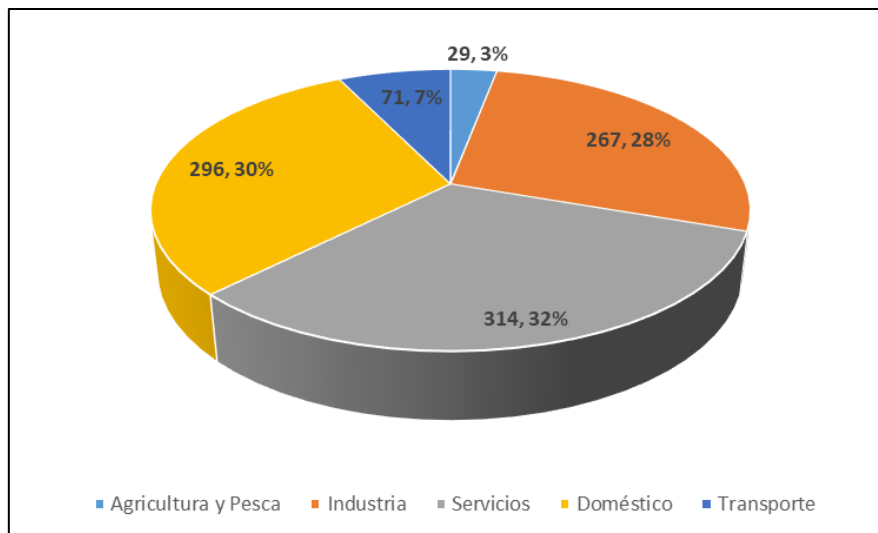


Figura 11. Consumo de energía eléctrica en Valencia por sectores en 2017 (10).

Los datos sugieren que la tecnología renovable, particularmente la fotovoltaica, tiene una zona de oportunidad en la sección de la edificación en Valencia para sustituir el consumo de energía eléctrica, reducir la emisión de gases de efecto invernadero y aumentar la participación de energía renovable en el mix energético.

Es posible estimar el desglose del consumo de energía eléctrica en Valencia para el sector doméstico al aplicar los porcentajes calculados por el IDAE (ver Figura 7). En la Figura 12 se muestra que el 74 % corresponde a iluminación y electrodomésticos, un 9 % a cocina, un 9 % a sistemas de calefacción y refrigeración, y un 8 % a agua caliente sanitaria.

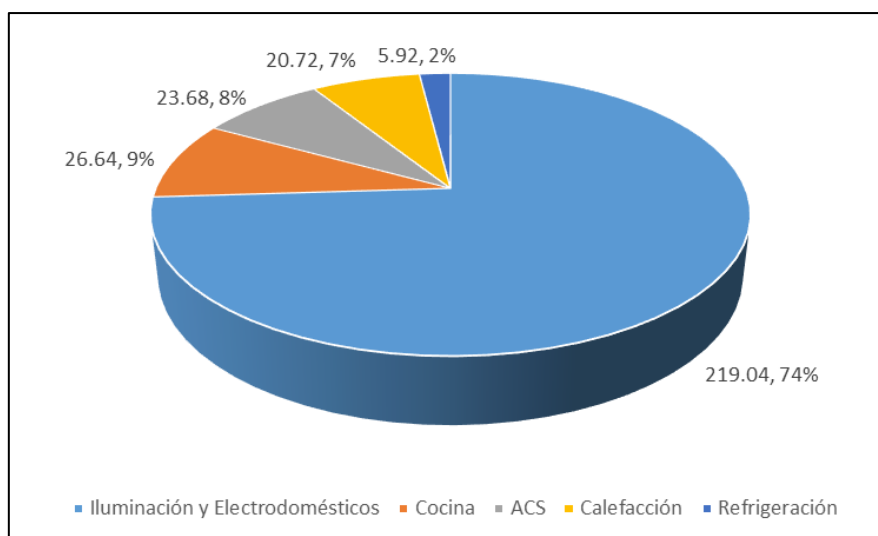


Figura 12. Consumo de energía eléctrica en el sector doméstico en Valencia en 2017.

Ante la situación actual y los datos previamente presentados, el Ayuntamiento de Valencia (11) ha renovado los objetivos del Plan de Acción para el Clima y la Energía Sostenible (PACES) del 2030, los cuales son:

- Al menos 40% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (en relación con los niveles de 1990).
- Al menos 27% de participación de las energías renovables.
- Al menos 27% de mejora de la eficiencia energética.
- Aumentar la resiliencia al cambio climático.

El propósito de estos objetivos es lograr que la ciudad de Valencia sea una basada en energía sostenible, segura y asequible, que sea resiliente a los efectos del cambio climático y proporcione a sus habitantes una elevada calidad de vida. Dentro de los objetivos del PACES, la tecnología fotovoltaica puede contribuir principalmente a los primeros dos puntos.

1.1.4. SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR FOTOVOLTAICO

En esta sección se describe la evolución del sector fotovoltaico nacional durante la última década, también se hace una breve revisión de las nuevas normativas y finalmente, exponer el cambio de los costes de la tecnología fotovoltaica en los últimos tiempos.

GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La potencia instalada fotovoltaica se situó a finales del 2019 en 8.913 MW a nivel nacional (12). Después de cinco años en los que el crecimiento de energía fotovoltaica fue mínimo, con incrementos que apenas superaban el 0,5%, en el 2019, se alcanzó la cifra de casi 9.000 MW instalados, lo que supone un incremento respecto al año 2018 de casi un 90%. El incremento de más de 4.000 MW es el más elevado de la historia.

Diseño de una Herramienta Automática de Optimización de Instalación de Paneles Fotovoltaicos en Cubiertas de Edificios

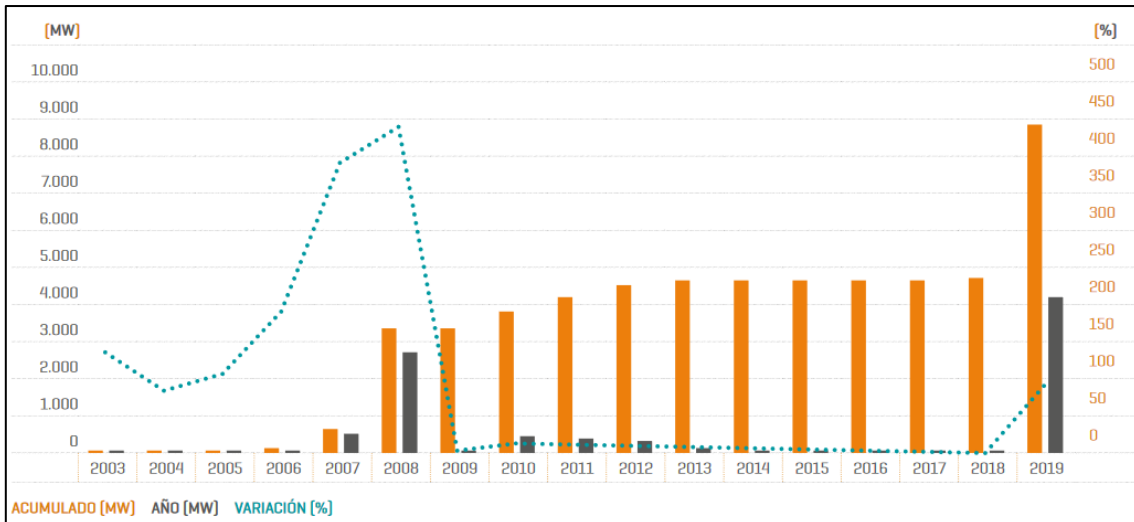


Figura 13. Potencia fotovoltaica instalada. Sistema eléctrico nacional (12).

Durante el 2019, se generó la mayor cantidad de energía fotovoltaica de la que se tiene registro, con una magnitud por encima de 9.000 GWh, lo que equivale a un incremento del 12,5 % con respecto al año 2018.

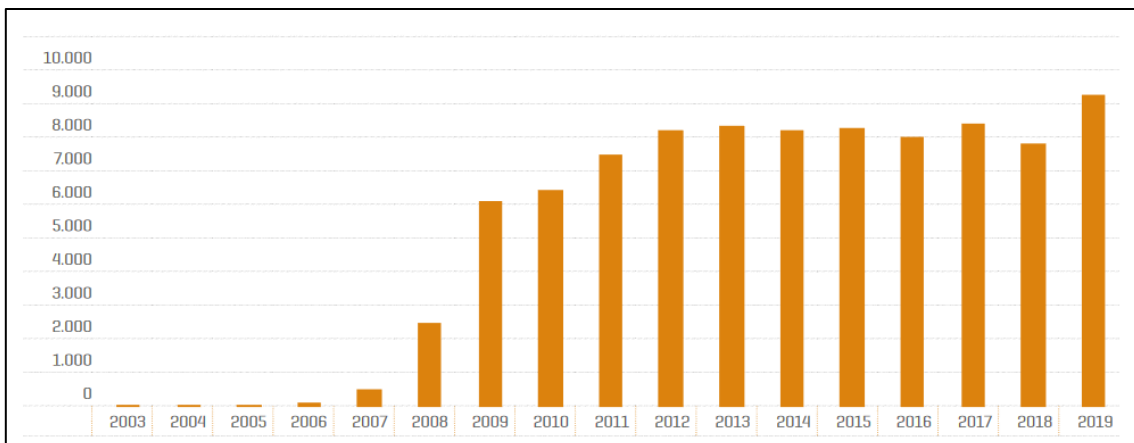


Figura 14. Generación fotovoltaica. Sistema eléctrico nacional (GWh) (12).

A nivel de comunidades autónomas, Andalucía es la región con más potencia fotovoltaica instalada con más de un 20% de toda la potencia nacional, seguida por Castilla-La Mancha y algo más lejos Extremadura y Murcia. Estas cuatro comunidades abarcan más del 60% de la potencia nacional. En el caso de Valencia, solo cubre el 4,1 % de todo el parque fotovoltaico.

Diseño de una Herramienta Automática de Optimización de Instalación de Paneles
Fotovoltaicos en Cubiertas de Edificios

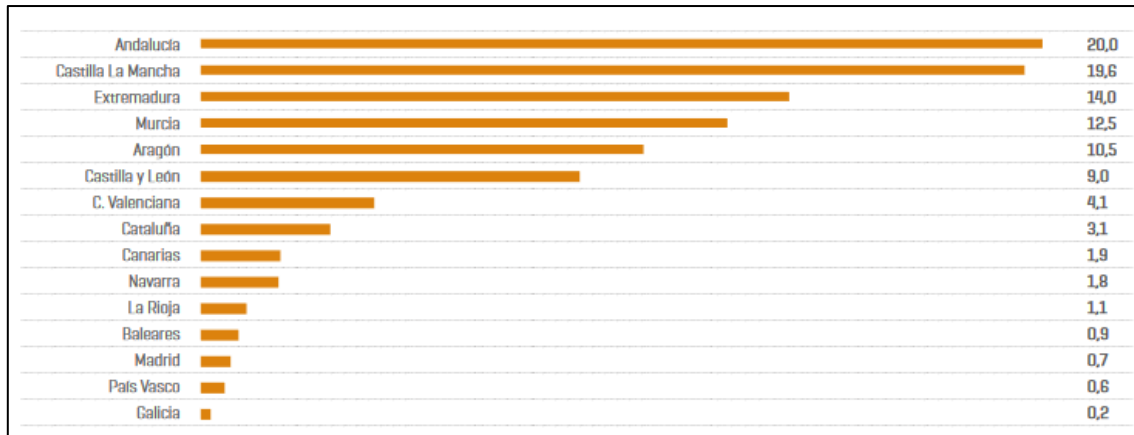


Figura 15. Porcentaje de potencia fotovoltaica instalada de cada comunidad autónoma del total nacional (12).

No obstante, a pesar de los valores históricos de generación de energía fotovoltaica en el 2019, el sector fotovoltaico solo representa el 3,5% del mix energético, el cual tiene como principales factores al sector nuclear, ciclo combinado y eólica con aproximadamente 21% cada uno.

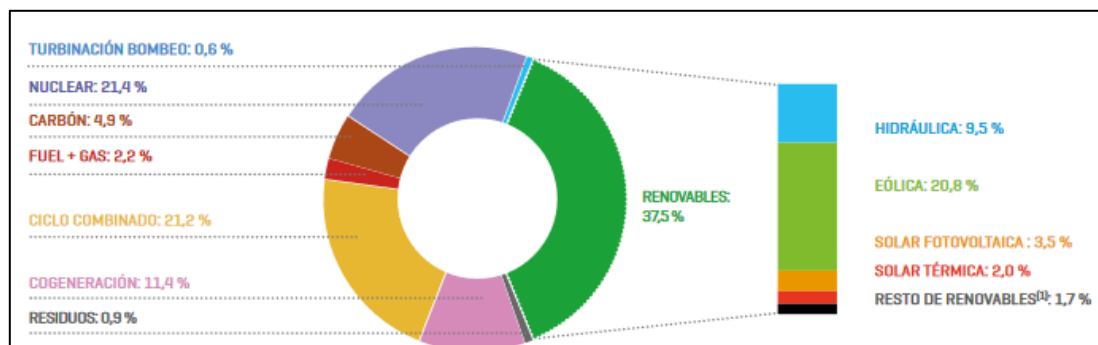


Figura 16. Estructura de generación de energía eléctrica en 2019 en el sistema eléctrico nacional (12).

Para el autoconsumo, de acuerdo al último reporte anual de la UNEF (13), se estima que se instaló una potencia fotovoltaica de 459 MW, lo cual representa el doble de lo que se instaló en 2018. La UNEF estima que se tiene una potencia acumulada de 943 MW. Estos valores reflejan las modificaciones normativas que se han implementado en los últimos años, en los cuales se definen con mayor claridad los marcos regulatorios para este tipo de instalaciones, no obstante, estos datos siguen siendo estimaciones ya que no se ha implementado una base de datos nacional para llevar registro del autoconsumo en todas las comunidades autónomas (13).

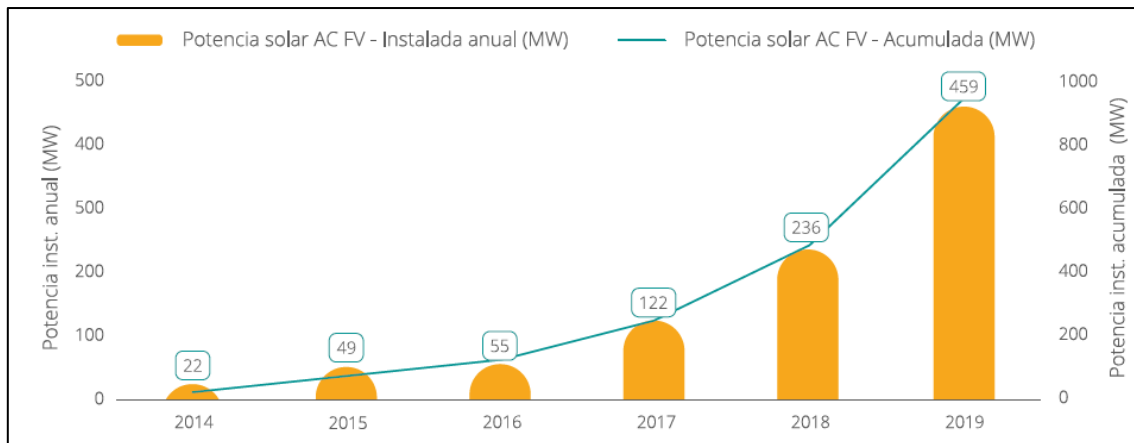


Figura 17. Estimación de la potencia instalada de autoconsumo fotovoltaico (13).

NORMATIVA EN 2020

De todos la normativa y reformas que se han hecho en los últimos años, para el sector fotovoltaico, en particular, la aprobación de los RD 15/2018 y 244/2019 ha dado un marco regulatorio más adecuado para el autoconsumo de energía renovable. A continuación, se mencionan las principales características (14):

- Reducción y simplificación de trámites administrativos, especialmente en instalaciones de pequeña y mediana potencia (hasta 100 kW_n) y en los casos de instalaciones sin excedentes.
- Inclusión y desarrollo del autoconsumo colectivo, posibilitando que varios consumidores puedan asociarse a una misma planta de generación.
- Desarrollo del mecanismo de compensación de la energía producida y no consumida en instalaciones iguales o inferiores a 100 kW bajo el concepto “compensación simplificada de los excedentes”.

El último Real Decreto-ley RD 23/2020 publicado en junio 23 es una respuesta a las presiones externas e internas para impulsar la descarbonización de la economía, así como establecer una base de desarrollo en la etapa post-COVID. En seguida, se describen las principales características del mismo (15):

- Regulación del Acceso y Conexión de los proyectos, así como la simplificación de trámites administrativos.
- Modificación al proceso de subastas de generación de energía eléctrica mediante la concurrencia competitiva y el establecimiento del precio de la energía “as-bid”.
- Inclusión de las comunidades de energías renovables dentro de las subastas.
- Los proyectos de pequeña potencia podrán ser eximidos del procedimiento de la concurrencia competitiva, pero pudiendo tomar como marco retributivo el resultado de dicho procedimiento para garantizar la orientación a la eficiencia en costes.

EVOLUCIÓN DE COSTOS

Otro factor importante a considerar en la implementación de tecnología renovable son los costos de la misma. El último estudio de IRENA (Agencia Internacional de Energía Renovable) muestra la evolución del costo total instalado, factor de capacidad y LCOE (Levelised Cost of Electricity) para parques fotovoltaicos. Entre el año 2010 y 2019, el costo total instalado ha disminuido un 79 %, el factor de capacidad ha incrementado un 28% y el LCOE ha disminuido un 82% (16).

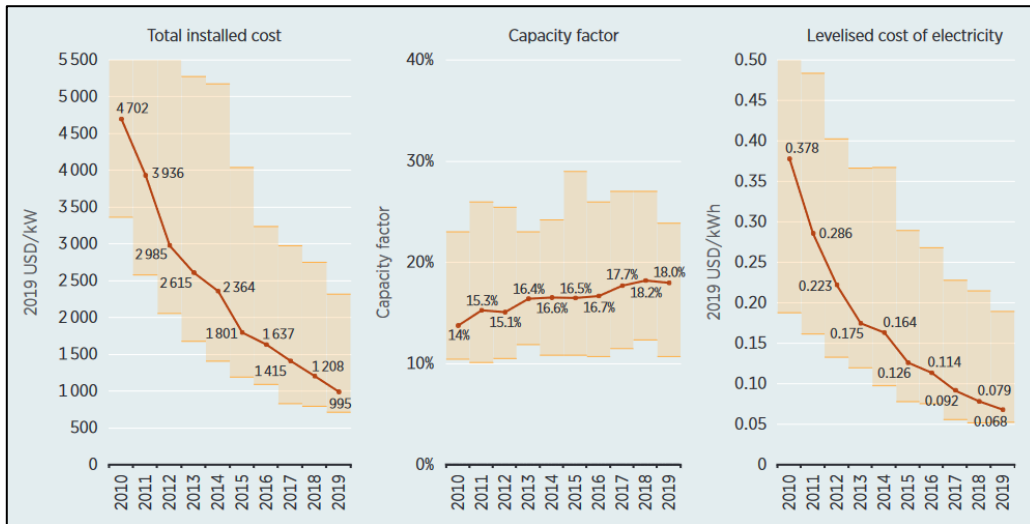


Figura 18. Costo total instalado, factor de capacidad y LCOE de parques fotovoltaicos (16).

Una explicación de las mejoras en los costos de la energía fotovoltaica se debe a la reducción del costo de los módulos fotovoltaicos. En el periodo de 2010 hasta 2020, en promedio los módulos fotovoltaicos han disminuido su costo en 80% (16).

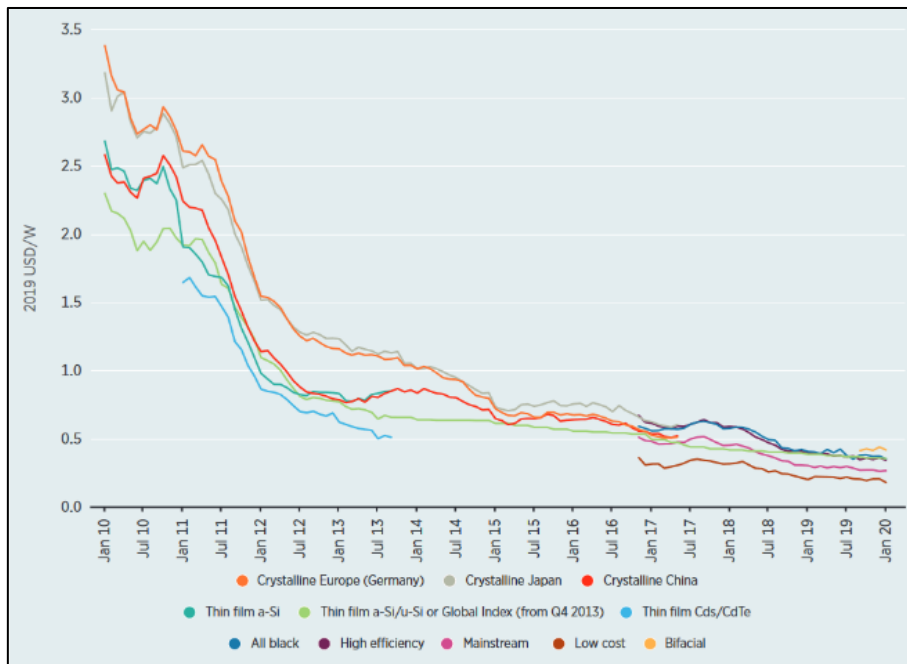


Figura 19. LCOE de varios tipos de módulos fotovoltaicos por tecnología y país (16).

Finalmente, en el último reporte de LAZARD (17), muestra que el LCOE de la energía fotovoltaica a nivel de parque solar es menor que el correspondiente que sus similares de fuentes convencionales (carbón, gas natural, etc.), por otra parte, el LCOE del sector residencial todavía es mayor a las energías convencionales, lo cual representa una buena oportunidad de mejora ya que si se llega a implementar la energía fotovoltaica de forma masiva en el sector residencial, se tendría un efecto de escala similar al de los parques fotovoltaicos.

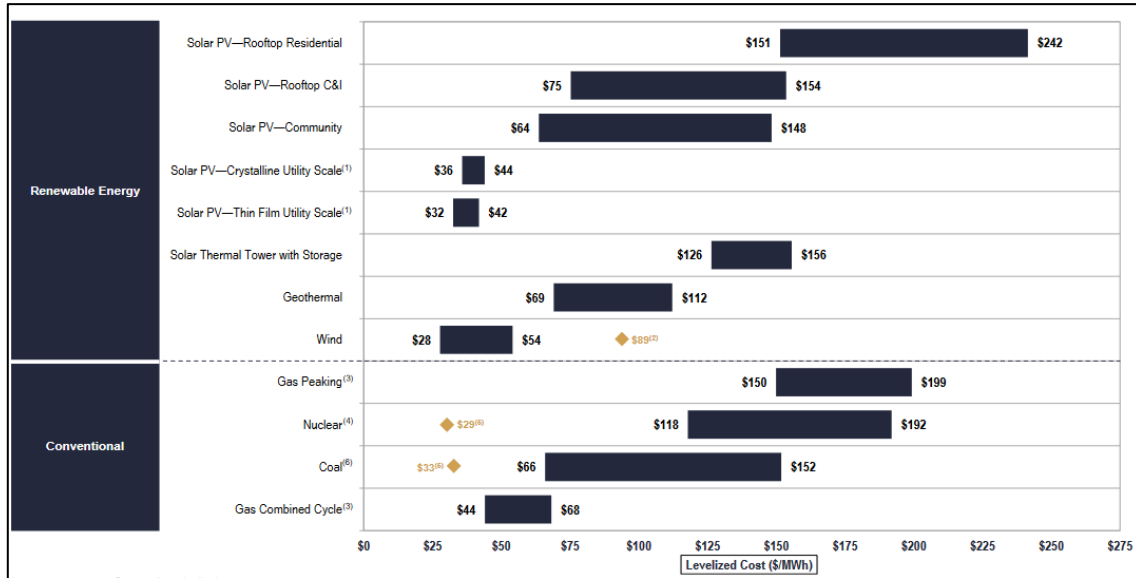


Figura 20. LCOE de diferentes tecnologías incluyendo renovables y convencionales (17).

1.2. JUSTIFICACIÓN

Como se ha mencionado en los apartados anteriores, la energía fotovoltaica está tomando un gran auge a nivel nacional en cuanto a participación en el mix energético, producción, costes y legislación.

En los proyectos en un ambiente urbano, los puntos más favorables para la instalación de la tecnología fotovoltaica son las cubiertas de los edificios. De acuerdo al proyecto PROSUME (18), en Valencia se tiene una superficie disponible en cubiertas aproximada de 4.148.273 m². Según ANPIER (14), los sectores que mayor beneficio obtendrían son las PYMES y las residencias plurifamiliares en bloque tomando en cuenta el sistema eléctrico nacional.

Un aspecto importante para cualquier proyecto de estas características es evaluar el potencial fotovoltaico que tiene una cubierta tomando en cuenta diferentes factores como la radiación solar, orientación, sombras, curva de demanda, obstáculos, etc.

Existen diferentes metodologías para estimar el área disponible en cubiertas en las primeras etapas de un proyecto, la mayoría basándose en datos LIDAR y catastrales. Una vez calculada dicha área, es común utilizar un factor de conversión para determinar la potencia pico instalada en dicha cubierta, este valor tiene un gran efecto en los resultados y varía de acuerdo a la fuente que se utilice. El Instituto Enerxético de Galicia utiliza un rango de 8-10 m²/kW_p (19), EnerAgen en su informe “Posibilidades de Autoconsumoaldetalle” aplica un valor de 7 m²/kW_p (20) y el informe de “Posibilidades de implantación de instalaciones fotovoltaicas en la industria valenciana” de Grupotech emplea un valor de 16 m²/kW_p (21).

Por otra parte, es común en estos proyectos usar uno de los dos siguientes enfoques al momento de optimizar la generación de energía fotovoltaica:

- Ángulo óptimo de inclinación del panel y orientación al sur.
- Ángulo y orientación óptimos de acuerdo a los obstáculos cercanos.

En la práctica, los paneles fotovoltaicos se alinean con el perfil de la cubierta en arreglos rectangulares para aprovechar la mayor cantidad de área disponible. No obstante, las cubiertas normalmente no tienen la orientación adecuada para obtener la mayor cantidad de energía fotovoltaica requerida. Además, se deben tomar en cuenta la geometría de la cubierta y del panel fotovoltaico a instalar. Esto abre la posibilidad de que un arreglo mal orientado con una potencia instalada mayor genere mayor energía a lo largo del año que un arreglo bien orientado con una potencia instalada mucho menor debido a las restricciones espaciales de la cubierta y el panel fotovoltaico.

En cuestión de esta problemática, Zhong y Tong (22) publicaron una metodología de optimización espacial de paneles fotovoltaicos para cubiertas. En dicho documento, elaboraron una cuadrícula para la colocación de paneles fotovoltaicos y determinaron las regiones adyacentes no disponibles a un panel dependiendo del tipo de orientación (horizontal o vertical) y tipo de instalación (sin alinear, alineación horizontal, alineación vertical) utilizando un panel fotovoltaico típico de 183 cm x 122 cm. No obstante, en su metodología se considera que el panel es paralelo a la cubierta y, por ende, no se genera ninguna sombra entre filas. También no se considera un espacio entre columnas para la ventilación de aire de los paneles. Cabe mencionar que la mayoría de las cubiertas de los edificios son planas y siempre se busca el ángulo óptimo de inclinación de los paneles, que tiene como consecuencia la generación de sombras entre filas.

1.3. OBJETIVOS

Considerando los antecedentes y contexto que rodea a la energía fotovoltaica aplicada en cubiertas de edificios en una urbanización, este trabajo aporta lo siguiente:

1. Establecer la metodología de una herramienta automática para comparar la generación eléctrica anual de diferentes orientaciones, posicionamiento, potencias de paneles e inclinación de arreglos fotovoltaicos en una sección dada de una cubierta de un edificio con potencial de ser traducida a un lenguaje de programación.
2. Valores de m^2/kW_p para diferentes potencias de paneles y ángulo de inclinación en base a las dimensiones geométricas del espacio disponible en la cubierta y del panel mismo para su inserción en otras herramientas automáticas de estimación de energía generada por paneles fotovoltaicos en cubiertas de edificios.

1.4. ESTRUCTURA

De acuerdo a los objetivos establecidos en la sección anterior, este trabajo, sin contar con el presente capítulo, se divide en dos capítulos, uno para cada objetivo. Al final del documento se presentan las conclusiones del trabajo.

CAPÍTULO 2: Desarrollo de la metodología de optimización de paneles fotovoltaicos en cubiertas.

- Determinación de paneles fotovoltaicos típicos de diferentes potencias.
- Desarrollo de procedimiento para determinar las dimensiones geométricas de un arreglo de paneles.
- Caracterización de superficies en cubiertas.
- Desarrollo de relaciones de conversión de potencias de paneles en función del ángulo de azimut e inclinación.
- Descripción de la metodología de optimización de arreglos de paneles.
- Incorporación de la reducción de gases contaminantes en la metodología.
- Ejemplo de aplicación

CAPÍTULO 3: Proporción m^2/kW_p en cubiertas

- Desarrollo de la base de datos de relaciones m^2/kW_p en función de las dimensiones del área a cubrir, potencia del panel, colocación y ángulo de inclinación
- Agrupación de los datos con el propósito de identificar tendencias y posibles relaciones
- Análisis de resultados de las distintas agrupaciones hechas y recomendaciones.

CAPÍTULO 4: Conclusiones.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN CUBIERTAS

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la metodología de optimización de paneles fotovoltaicos en cubiertas teniendo como datos de entrada las dimensiones geométricas y orientación del área a analizar.

Esta metodología toma en cuenta la geometría del panel, potencia, orientación, colocación y ángulo de inclinación para formar arreglos de paneles, los cuales se comparan unos con otros mediante relaciones de conversión y de esa forma obtener el arreglo óptimo que genere la mayor cantidad de energía anual y recibiendo una radiación homogénea en toda el área a analizar.

Asimismo, se incluye un apartado de reducción de emisiones de contaminantes en función de la energía generada al año, su ángulo de inclinación y azimut, además se toma en cuenta la cantidad de emisiones que se generan al fabricar, operar, mantener y desechar una instalación fotovoltaica y la correspondiente relacionada al consumo de energía eléctrica de la red convencional.

Finalmente, se aplica toda la metodología a un ejemplo con propósitos ilustrativos y comprobatorios mediante una herramienta en línea.

2.2 ARREGLOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS

En esta sección se desarrolla la metodología para determinar las dimensiones geométricas necesarias de un arreglo de paneles fotovoltaicos en función de la potencia, colocación y ángulo de inclinación del mismo a partir de normativas y típicos de paneles fotovoltaicos comerciales.

2.2.1 TÍPICOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS COMERCIALES A DIFERENTES POTENCIAS

Hoy en día existen muchos fabricantes de paneles fotovoltaicos, sin embargo, las potencias nominales de los mismos no son tan variados, a saber, actualmente las potencias más comunes son 275 W, 330 W y 400 W. Entonces, como primer paso, es comparar las dimensiones de estas potencias nominales de diferentes fabricantes para encontrar las dimensiones de un panel típico. Las dimensiones geométricas de un panel fotovoltaico se muestran en la Figura 21 donde L es el largo, W el ancho y H el espesor del panel.

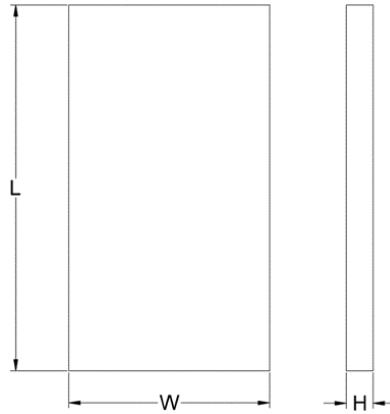


Figura 21. Dimensiones de un panel fotovoltaico.

En las Tabla 1 y Tabla 2 se muestran las dimensiones geométricas de diferentes fabricantes para las diferentes potencias de 275 W, 330 W y 400 W.

Concepto	Largo L (m)	Ancho W (m)	Espesor H (m)
Atersa			
275 W	1,640	0,992	0,035
330 W	2,000	1,000	0,060
Tamesol			
275 W	1,640	0,992	0,035
330 W	1,956	0,942	0,040
Zytech			
275 W	1,640	0,992	0,035
330 W	1,956	0,992	0,040
Eurener			
275 W	1,640	0,992	0,035
330 W	1,957	0,992	0,040
Iberian Solar			
275 W	1,640	0,992	0,035
330 W	1,956	0,992	0,035
Rekoser			
275 W	1,950	0,990	0,040
320 W	1,950	0,990	0,040

Tabla 1. Paneles fotovoltaicos comerciales de 275 W, 330 W.

Concepto	Largo L (m)	Ancho W (m)	Espesor H (m)
Canadian Solar			
400 W	2,108	1,048	0,040
Era Solar			
400 W	1,979	1,002	0,040
JA Solar			
400 W	2,015	0,996	0,040
Solarzity			
400 W	2,025	0,996	0,040
GM			
400 W	2,015	1,002	0,040
Jinko			
400 W	2,008	1,002	0,040

Tabla 2. Paneles fotovoltaicos comerciales de 400 W.

Al tomar el promedio de cada potencia de todos los paneles comerciales se obtienen las dimensiones típicas de las diferentes potencias como se muestra en la Tabla 3:

Panel fotovoltaico	Largo L (m)	Ancho W (m)	Espesor H (m)
275 W	1,640	0,992	0,035
330 W	1,956	0,992	0,040
400 W	2,015	1,002	0,040

Tabla 3. Dimensiones de los paneles típicos para las diferentes potencias.

Como se muestra en la Tabla 3, a medida que se incrementa la potencia nominal del panel también lo hacen sus dimensiones geométricas. Una manera de cuantificar el aprovechamiento del espacio de un panel fotovoltaico es por medio de la proporción potencia nominal y el área superficial del panel mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{W}{m^2} = \frac{P_{nom}}{WL} \quad (1)$$

Donde:

P_{nom} = Potencia nominal del panel (W).

W = Ancho del panel fotovoltaico (m).

L = Largo del panel fotovoltaico (m).

Al aplicar la Ecuación (1) a cada uno de los paneles típicos se tiene:

- Panel 275 W -> 169, 03 W/m².
- Panel 330 W -> 170, 07 W/m².
- Panel 400 W -> 198, 11 W/m².

Los resultados obtenidos muestran que el incremento de potencia nominal de los paneles supera el requisito de mayor espacio debido a su aumento de tamaño.

2.2.2 BLOQUES DE ARREGLOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS

Como la geometría de los paneles fotovoltaicos es rectangular, la forma más práctica de formar arreglos con ellos es alinearlos en filas y columnas como se muestra en la Figura 22. En esta figura la longitud del arreglo se representa mediante la dimensión A mientras que la anchura del arreglo con la dimensión B.

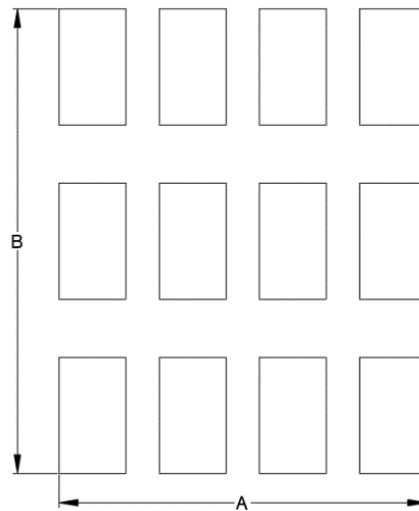


Figura 22. Esquemático del arreglo de paneles fotovoltaicos.

Cabe mencionar que existen otras formas de arreglos de paneles fotovoltaicos como puede ser alinearlos únicamente a lo largo o a lo ancho (Figura 23), también existe la posibilidad de que sea totalmente libre como se muestra en la Figura 24, esta configuración es la que representa la mayor flexibilidad, pero es la más compleja de estimar y llevar a la práctica.

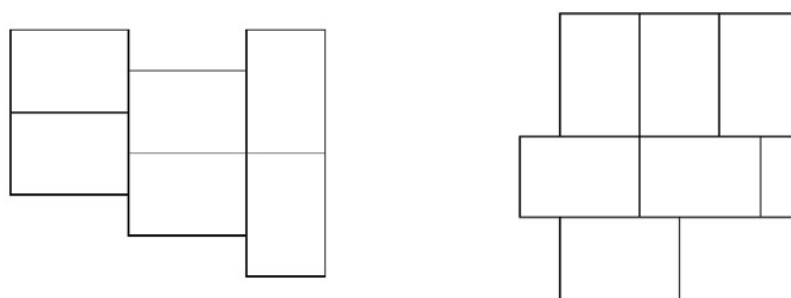


Figura 23. Esquemático del arreglo por filas o columnas de paneles fotovoltaicos (22).

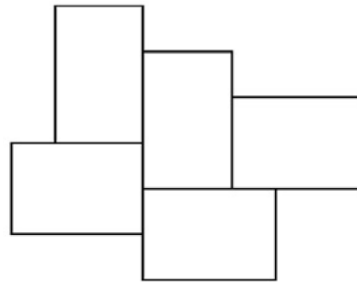


Figura 24. Esquemático del arreglo sin alinear de paneles fotovoltaicos (22).

La configuración de la Figura 22 es la que tiene más restricción pero más sencilla de estimar y es la más común en la práctica. Por ende, en este trabajo solo se considera el arreglo rectangular por filas y columnas de la Figura 22.

Otro aspecto importante a considerar en el arreglo de paneles fotovoltaicos es el espaciamiento necesario para evitar ensombrecimiento por los paneles mismos.

Para el caso particular de España, el IDAE (23) propone la siguiente ecuación para determinar la distancia mínima entre filas de paneles fotovoltaicos para garantizar al menos 4 horas de sol en torno al mediodía del solsticio de invierno en cada panel:

$$d = \frac{h}{\tan(61^\circ - \text{latitud})} = hk \quad (2)$$

Donde:

d = Distancia mínima entre filas de paneles fotovoltaicos (m).

h = Altura del obstáculo que proyecta sombras sobre el panel fotovoltaico (m).

k = Factor adimensional en función de la latitud del lugar.

La Figura 25 muestra la interpretación gráfica de la Ecuación (2).

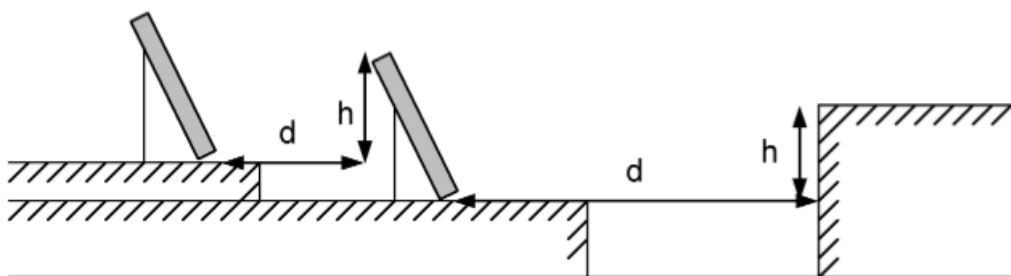


Figura 25. Distancia mínima d debido a un obstáculo (23).

La ciudad de Valencia se encuentra a una latitud de 39° y sustituyendo este valor en la Ecuación (2) se obtiene que el factor adimensional es igual a 2,475. Por ende, se tiene la siguiente ecuación:

$$d = 2,475 h \quad (3)$$

El siguiente paso es determinar la altura h para este trabajo, en el caso de la distancia mínima entre paneles, es la distancia vertical del panel mismo cuando se tiene un cierto ángulo de inclinación como muestra en la Figura 26.

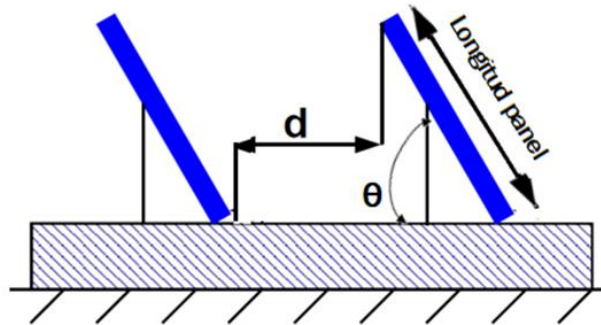


Figura 26. Distancia mínima d entre filas de paneles fotovoltaicos.

Tomando en consideración lo mostrado en la Figura 26 se puede determinar la altura h mediante la siguiente ecuación:

$$d = 2,475 L_{panel} \operatorname{sen}\theta \quad (4)$$

Donde:

L_{panel} = Longitud del panel inclinado, dicho valor puede ser igual a su largo L o ancho W (m).

θ = Ángulo de inclinación del panel ($^{\circ}$).

Una vez determinada la distancia mínima d entre filas de paneles fotovoltaicos con la Ecuación (4), se procede a estimar la distancia entre columnas. Para este caso, no existe alguna normativa que establezca un espaciamiento mínimo, por ende, se estima una distancia de 0,02 m (2 cm) con la justificación de permitir la circulación de aire entre columnas, evitar un sobrecalentamiento y permitir una fácil manipulación de los paneles fotovoltaicos tal como se muestra en la Figura 27.

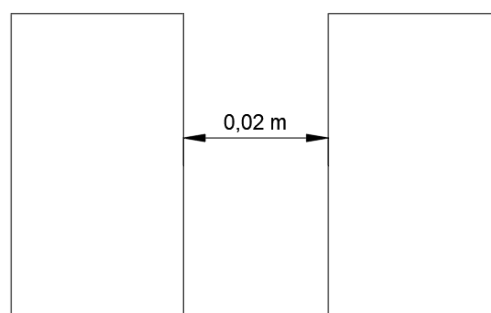


Figura 27. Distancia de 0,02 m entre columnas de paneles fotovoltaicos.

Dentro del arreglo rectangular se pueden colocar los paneles en dos posiciones, a saber:

- Recostando el panel fotovoltaico sobre su lado largo L .
- Recostando el panel fotovoltaico sobre su lado ancho W .

Estas dos formas de colocación se toman en cuenta en la construcción de arreglos.

Al combinar todo lo descrito anteriormente, se pueden desarrollar dos sistemas de bloques: un arreglo con dimensiones A_L y B_L con el panel colocado sobre su lado largo L ; y otro con dimensiones A_W y B_W con el panel colocado sobre su lado ancho W .

Para el caso del panel recostado sobre su lado largo L se tiene que la dimensión A_L para un número determinado de columnas puede estimarse con la siguiente ecuación:

$$A_L = n_{col}L + 0,02(n_{col} - 1) \quad (5)$$

Donde:

A_L = Longitud del arreglo de paneles sobre su lado largo L (m).

n_{col} = Número de columnas del arreglo.

L = Largo del panel fotovoltaico (m).

Al sustituir el largo del panel fotovoltaico en la Ecuación (4) y considerando un número determinado de filas, se puede determinar la dimensión B_L mediante la siguiente ecuación:

$$B_L = W[n_{filas} \cos\theta + 2,475(n_{filas} - 1)\text{sen}\theta] \quad (6)$$

Donde:

B_L = Anchura del arreglo de paneles sobre su lado largo L (m).

n_{filas} = Número de filas del arreglo.

W = Ancho del panel fotovoltaico (m).

Por otro lado, para el caso del panel recostado sobre su lado ancho W se tiene que la dimensión A_W para un número determinado de columnas puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$A_W = n_{col}W + 0,02(n_{col} - 1) \quad (7)$$

Donde:

A_W = Longitud del arreglo de paneles sobre su lado ancho W (m).

Al sustituir el ancho del panel fotovoltaico en la Ecuación (4) y considerando un número determinado de filas, se puede calcular la dimensión B_W con la siguiente ecuación:

$$B_W = L[n_{filas} \cos\theta + 2,475(n_{filas} - 1)\text{sen}\theta] \quad (8)$$

Donde:

B_W = Anchura del arreglo de paneles sobre su lado ancho W (m).

Para este trabajo se consideran 5 ángulos de inclinación con 5° de separación entre ellos. El valor medio se considera igual a 35° ya que se considera como el ángulo óptimo general para la ciudad de Valencia (24). Entonces se tiene los siguientes ángulos de inclinación del panel: 25° , 30° , 35° , 40° y 45° .

Debido a la variedad de potencia nominal de paneles fotovoltaicos (275 W, 330 W y 400 W), tipo de colocación (recostado sobre el largo L y ancho W) y los 5 ángulos de inclinación del panel se utiliza la nomenclatura mostrada en la Figura 28 para diferenciar los diferentes arreglos en las secciones siguientes.

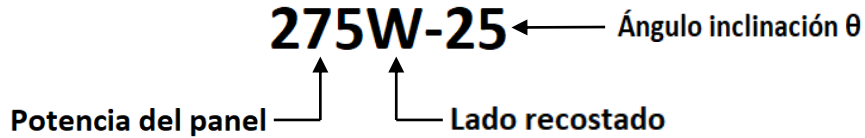


Figura 28. Nomenclatura utilizada para diferenciar los arreglos de paneles fotovoltaicos.

A partir de las Ecuaciones (5) – (8) se pueden determinar las distancias mínimas para acomodar un número de columnas y filas determinados. La Figura 29 muestra dichas distancias para todas las posibles combinaciones de potencia, colocación y ángulo de inclinación cuando varía el número de columnas/filas desde 1 hasta 10 y se puede ampliar el número de columnas y filas hasta la cantidad que se desee fácilmente.

Por ejemplo, si se necesitarán 3 filas y 5 columnas para acomodar el arreglo 330W-35, se tendría un rectángulo con una longitud de 5,04 m, y una anchura de 10,36 m para instalar 15 paneles fotovoltaicos, teniendo una potencia pico instalada de 4,95 kW_p con una inclinación de 35° recostado sobre su lado ancho de 0,992 m.

275W-25										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.99	2.00	3.02	4.03	5.04	6.05	7.06	8.08	9.09	10.10
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.49	4.69	7.89	11.09	14.29	17.50	20.70	23.90	27.10	30.30

275W-30										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.99	2.00	3.02	4.03	5.04	6.05	7.06	8.08	9.09	10.10
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.42	4.87	8.32	11.77	15.22	18.67	22.12	25.57	29.02	32.47

275W-35										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.99	2.00	3.02	4.03	5.04	6.05	7.06	8.08	9.09	10.10
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.34	5.01	8.69	12.36	16.03	19.70	23.37	27.04	30.72	34.39

275W-40										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.99	2.00	3.02	4.03	5.04	6.05	7.06	8.08	9.09	10.10
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.26	5.12	8.99	12.85	16.72	20.58	24.45	28.31	32.18	36.04

275W-45										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.99	2.00	3.02	4.03	5.04	6.05	7.06	8.08	9.09	10.10
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.16	5.19	9.22	13.25	17.28	21.31	25.34	29.37	33.40	37.43

Figura 29. Distancias mínimas para todas las combinaciones al variar el número de columnas/filas.

Diseño de una Herramienta Automática de Optimización de Instalación de Paneles
Fotovoltaicos en Cubiertas de Edificios

275L-25										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.64	3.30	4.96	6.62	8.28	9.94	11.60	13.26	14.92	16.58
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.90	2.84	4.77	6.71	8.65	10.58	12.52	14.46	16.39	18.33

275L-30										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.64	3.30	4.96	6.62	8.28	9.94	11.60	13.26	14.92	16.58
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.86	2.95	5.03	7.12	9.21	11.29	13.38	15.47	17.55	19.64

275L-35										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.64	3.30	4.96	6.62	8.28	9.94	11.60	13.26	14.92	16.58
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.81	3.03	5.25	7.48	9.70	11.92	14.14	16.36	18.58	20.80

275L-40										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.64	3.30	4.96	6.62	8.28	9.94	11.60	13.26	14.92	16.58
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.76	3.10	5.44	7.77	10.11	12.45	14.79	17.13	19.46	21.80

275L-45										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.64	3.30	4.96	6.62	8.28	9.94	11.60	13.26	14.92	16.58
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.70	3.14	5.58	8.01	10.45	12.89	15.33	17.76	20.20	22.64

330W-25										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.99	2.00	3.02	4.03	5.04	6.05	7.06	8.08	9.09	10.10
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.77	5.59	9.41	13.23	17.05	20.87	24.68	28.50	32.32	36.14

330W-30										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.99	2.00	3.02	4.03	5.04	6.05	7.06	8.08	9.09	10.10
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.69	5.81	9.92	14.04	18.15	22.27	26.38	30.50	34.61	38.72

330W-35										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.99	2.00	3.02	4.03	5.04	6.05	7.06	8.08	9.09	10.10
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.60	5.98	10.36	14.74	19.12	23.50	27.88	32.26	36.63	41.01

330W-40										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.99	2.00	3.02	4.03	5.04	6.05	7.06	8.08	9.09	10.10
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.50	6.11	10.72	15.33	19.94	24.55	29.16	33.77	38.38	42.99

Figura 29. Distancias mínimas para todas las combinaciones al variar el número de columnas/filas.

Diseño de una Herramienta Automática de Optimización de Instalación de Paneles Fotovoltaicos en Cubiertas de Edificios

330W-45										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.99	2.00	3.02	4.03	5.04	6.05	7.06	8.08	9.09	10.10
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.38	6.19	11.00	15.80	20.61	25.41	30.22	35.03	39.83	44.64

330L-25										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.96	3.93	5.91	7.88	9.86	11.84	13.81	15.79	17.76	19.74
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.90	2.84	4.77	6.71	8.65	10.58	12.52	14.46	16.39	18.33

330L-30										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.96	3.93	5.91	7.88	9.86	11.84	13.81	15.79	17.76	19.74
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.86	2.95	5.03	7.12	9.21	11.29	13.38	15.47	17.55	19.64

330L-35										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.96	3.93	5.91	7.88	9.86	11.84	13.81	15.79	17.76	19.74
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.81	3.03	5.25	7.48	9.70	11.92	14.14	16.36	18.58	20.80

330L-40										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.96	3.93	5.91	7.88	9.86	11.84	13.81	15.79	17.76	19.74
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.76	3.10	5.44	7.77	10.11	12.45	14.79	17.13	19.46	21.80

330L-45										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.96	3.93	5.91	7.88	9.86	11.84	13.81	15.79	17.76	19.74
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.70	3.14	5.58	8.01	10.45	12.89	15.33	17.76	20.20	22.64

400W-25										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.00	2.02	3.05	4.07	5.09	6.11	7.13	8.16	9.18	10.20
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.83	5.76	9.69	13.63	17.56	21.50	25.43	29.36	33.30	37.23

400W-30										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.00	2.02	3.05	4.07	5.09	6.11	7.13	8.16	9.18	10.20
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.75	5.98	10.22	14.46	18.70	22.94	27.18	31.42	35.65	39.89

400W-35										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.00	2.02	3.05	4.07	5.09	6.11	7.13	8.16	9.18	10.20
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.65	6.16	10.67	15.18	19.69	24.21	28.72	33.23	37.74	42.25

Figura 29. Distancias mínimas para todas las combinaciones al variar el número de columnas/filas.

Diseño de una Herramienta Automática de Optimización de Instalación de Paneles
Fotovoltaicos en Cubiertas de Edificios

400W-40										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.00	2.02	3.05	4.07	5.09	6.11	7.13	8.16	9.18	10.20
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.54	6.29	11.04	15.79	20.54	25.29	30.04	34.79	39.54	44.29

400W-45										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.00	2.02	3.05	4.07	5.09	6.11	7.13	8.16	9.18	10.20
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	1.42	6.38	11.33	16.28	21.23	26.18	31.13	36.08	41.03	45.99

400L-25										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	2.02	4.05	6.09	8.12	10.16	12.19	14.23	16.26	18.30	20.33
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.91	2.86	4.82	6.78	8.73	10.69	12.65	14.60	16.56	18.51

400L-30										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	2.02	4.05	6.09	8.12	10.16	12.19	14.23	16.26	18.30	20.33
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.87	2.98	5.08	7.19	9.30	11.41	13.51	15.62	17.73	19.84

400L-35										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	2.02	4.05	6.09	8.12	10.16	12.19	14.23	16.26	18.30	20.33
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.82	3.06	5.31	7.55	9.79	12.04	14.28	16.52	18.77	21.01

400L-40										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	2.02	4.05	6.09	8.12	10.16	12.19	14.23	16.26	18.30	20.33
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.77	3.13	5.49	7.85	10.21	12.58	14.94	17.30	19.66	22.02

400L-45										
DIMENSIÓN X										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	2.02	4.05	6.09	8.12	10.16	12.19	14.23	16.26	18.30	20.33
DIMENSIÓN Y										
Número de bloques	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Longitud	0.71	3.17	5.63	8.09	10.56	13.02	15.48	17.94	20.41	22.87

Figura 29. Distancias mínimas para todas las combinaciones al variar el número de columnas/filas.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE SUPERFICIES

Como se ha mencionado en el apartado anterior, en este trabajo los paneles fotovoltaicos solo forman arreglos rectangulares, por ese motivo la superficie de una cubierta debe ser dividida en rectángulos sin obstáculos en su interior, tal como se muestra en la Figura 30.



Figura 30. División de una cubierta en rectángulos libres de obstáculos.

Para la división de la cubierta se considera lo siguiente:

- Los paneles fotovoltaicos se instalan alineados con el contorno de la cubierta.
- Los espacios muertos son aquellos que tienen ensombrecimiento por obstáculos en la cubierta que pueden ser divididos en dos:
 - Internos: chimeneas, cajas de elevador, parapetos, etc.
 - Externos: edificios adyacentes, árboles, anuncios, etc.
- Los soportes de los paneles fotovoltaicos no requieren mayor espacio al requerido por los paneles fotovoltaicos.

Una vez dividida la superficie de la cubierta, se debe caracterizar cada rectángulo con tres parámetros:

- Largo.
- Ancho.
- Orientación (Ángulo medianera α).

Estos tres parámetros se muestran en la Figura 31.

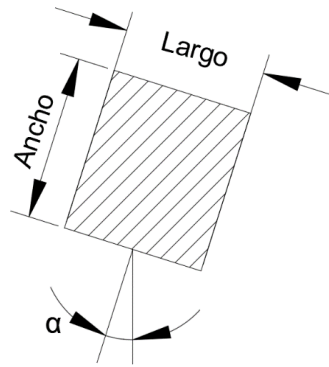


Figura 31. Parámetros que caracterizan a un rectángulo de la superficie.

Estos parámetros se utilizan para determinar el número de columnas y filas máximo de cada arreglo para cada potencia, colocación e inclinación, y de ese modo, calcular el número total de paneles y potencia instalada. Por otra parte, la orientación del rectángulo se utiliza para comparar las potencias instaladas de cada arreglo posible y se describe en secciones posteriores.

Otra variable que se considera es la posición del eje del panel fotovoltaico con respecto al ángulo de la cubierta o ángulo medianera α que se define como el ángulo más pequeño entre la cubierta y el Sur geográfico. Entonces el eje del panel puede estar alineado con el de la cubierta o con el ángulo complementario β , la Figura 32 muestra de forma gráfica el ángulo medianera α y el ángulo complementario β de una cubierta. Cabe mencionar que, en este trabajo, se considera que el ángulo complementario β se obtiene al sumar 90° al ángulo medianera α .

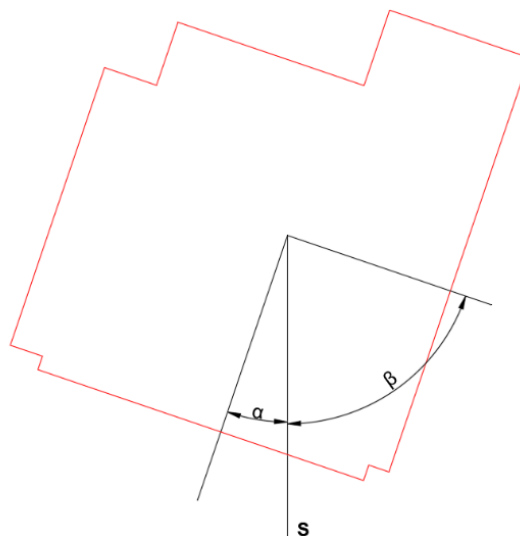


Figura 32. Definición de ángulo medianera α y complementario β .

También no se utiliza la programación computacional para determinar el número de filas y columnas máximo permitido para una superficie rectangular determinada y puede ser un siguiente paso a dar. Sin embargo, en este trabajo se propone un diagrama de flujo que puede servir como base para determinarlo.

Consiste en comparar el largo (o ancho) del rectángulo con la longitud (o anchura) del arreglo y si este último es menor, incrementar el número de columnas (o filas) del arreglo y volver a comparar hasta que sea mayor. La Figura 33 ilustra esta idea para determinar el número de paneles dentro del largo del rectángulo mediante la Ecuación (7) del arreglo.

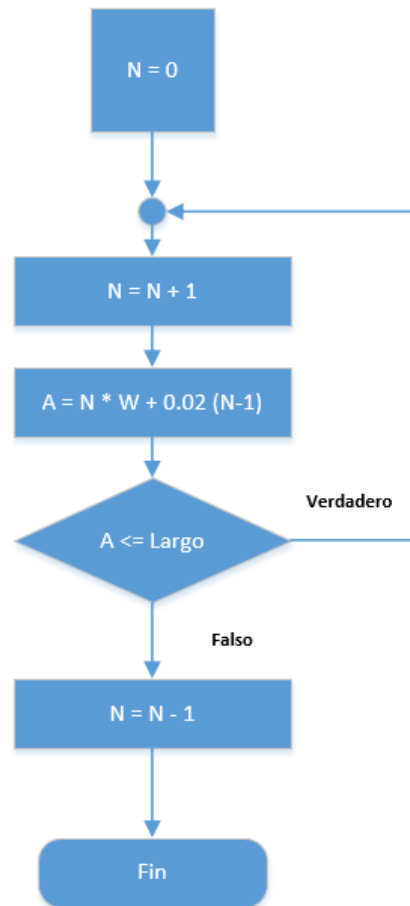


Figura 33. Diagrama de flujo para determinar el número máximo de paneles fotovoltaicos en una dimensión.

Cabe mencionar que para el caso de los arreglos con eje de azimut igual al ángulo complementario β , se repite el mismo procedimiento con la modificación de que en el programa de cálculo se invierten las dimensiones del rectángulo, es decir, para estos arreglos, el largo del rectángulo es ahora el límite para el ancho del arreglo, mientras que el ancho del rectángulo es ahora el límite para la longitud del arreglo.

2.4 RELACIONES DE CONVERSIÓN DE POTENCIA INSTALADA

Debido a la variedad de geometría disponible y orientación que tiene una cubierta, no es sencillo determinar que orientación, colocación e inclinación deben tener los paneles fotovoltaicos para obtener la mayor cantidad de energía generada anualmente. En esta sección se determinan varias relaciones de conversión de potencia instalada que toman en cuenta esos parámetros y que servirán en la metodología para encontrar el arreglo óptimo.

En primer lugar, es necesario tomar una muestra de edificios con diferentes orientaciones de la ciudad de Valencia. En este trabajo se analizaron las cubiertas de 25 edificios incluyendo edificios residenciales en bloque, comerciales y públicos, la Tabla 4 muestra las coordenadas de dichos edificios.

Edificio	Coordenadas	
	Latitud	Longitud
R1	39,479034	-0,352512
R2	39,461574	-0,35605
R3	39,458096	-0,373518
R4	39,473242	-0,384951
R5	39,454691	-0,362465
R6	39,460079	-0,339447
R7	39,486445	-0,395584
R8	39,456795	-0,386752
R9	39,469902	-0,371374
R10	39,473073	-0,367662
R11	39,462075	-0,390356
R12	39,468334	-0,394107
R13	39,486779	-0,373917
C1	39,49102	-0,398914
C2	39,470551	-0,371438
C3	39,47997	-0,393003
C4	39,457858	-0,403513
C5	39,451119	-0,358805
C6	39,487978	-0,366738
C7	39,475891	-0,403319
C8	39,493799	-0,359393
P1	39,46914	-0,383792
P2	39,480614	-0,341817
P3	39,479615	-0,382756
P4	39,47703	-0,354454

Tabla 4. Coordenadas de la muestra de edificios.

La selección de estos edificios se basó principalmente en la orientación de la cubierta ya que es la variable independiente en las relaciones de conversión y es importante tener el mayor rango posible.

Cada cubierta de cada edificio se dividió en rectángulos disponibles (ver Figura 30) y en cada área se determinó el número total de paneles fotovoltaicos, y por ende, la potencia pico instalada para cada tipo de arreglo (potencia del panel, colocación, orientación e inclinación). Posteriormente, se sumaron todas las potencias instaladas de cada rectángulo para obtener la potencia pico instalada total de la cubierta.

A continuación, con ayuda del software en línea PVGIS (24) se obtuvo la energía generada anual para cada arreglo. La Tabla 5 muestra un resumen de los edificios residenciales (R1 a R10) con la potencia pico instalada total (kW_p), la proporción m^2/kW_p y energía generada anualmente ($kWh/año$) para las configuraciones 275W-25, 275W-30 y 275W-35 cuando el arreglo de paneles fotovoltaicos está alineado con el eje de la cubierta, es decir, el ángulo de azimut (orientación) es igual a α .

Diseño de una Herramienta Automática de Optimización de Instalación de Paneles
Fotovoltaicos en Cubiertas de Edificios

Edificio	275W-25			275W-30			275W-35			Edificio
	kW instalados	m ² /kW	Energía generada (kWh/año)	kW instalados	m ² /kW	Energía generada (kWh/año)	kW instalados	m ² /kW	Energía generada (kWh/año)	
R1	5.775	13.52	9,115.53	5.775	13.52	9,198.30	5.775	13.52	9,225.60	R1
R2	7.150	5.95	10,929.04	7.150	5.95	10,992.62	7.150	5.95	11,001.80	R2
R3	29.700	11.46	46,810.58	29.700	11.46	47,224.34	29.700	11.46	47,367.25	R3
R4	6.600	10.38	10,548.14	6.600	10.38	10,671.25	6.600	10.38	10,731.05	R4
R5	3.575	17.03	5,567.00	3.575	17.03	5,608.42	3.575	17.03	5,624.68	R5
R6	11.000	10.71	17,339.52	11.000	10.71	17,540.61	11.000	10.71	17,625.97	R6
R7	10.175	11.02	15,918.56	10.175	11.02	16,053.17	10.175	11.02	16,100.66	R7
R8	2.200	12.06	3,371.61	2.200	12.06	3,393.55	2.200	12.06	3,398.36	R8
R9	7.975	10.66	12,802.01	7.975	10.66	12,950.70	7.975	10.66	13,022.41	R9
R10	19.250	12.03	29,860.12	18.150	12.75	28,344.91	18.150	12.75	28,409.48	R10

Tabla 5. Resumen de la potencia pico instalada y energía generada de varios edificios.

El concepto tras las relaciones de conversión de potencia pico instalada es encontrar la potencia pico instalada que genere la misma cantidad de energía de una configuración en particular al variar una de dos parámetros manteniendo el otro constante, a saber:

1. Variación del ángulo de azimut (α o β) manteniendo constante el ángulo de inclinación.
2. Variación del ángulo de inclinación manteniendo constante el ángulo de azimut.

A continuación, se describen ambos casos cuyas gráficas y ecuaciones de tendencia respectivas se utilizan en la metodología que se explica a detalle más adelante. Cabe mencionar que la convención de signos de los ángulos de azimut es el siguiente:

- Sur \rightarrow 0°
- Este \rightarrow -90°
- Oeste \rightarrow 90°

CASO I: VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE AZIMUT CON ÁNGULO DE INCLINACIÓN CONSTANTE

La Tabla 6 muestra un ejemplo de un edificio en el cual se determina la potencia instalada necesaria si se tiene un ángulo de azimut igual a β o $\gamma = 0^\circ$ (alineado con el Sur) para generar la misma cantidad de energía anual que un arreglo alineado con el ángulo medianera α para todas las combinaciones posibles con un ángulo de inclinación igual a 40° .

	Ángulo pendiente 40°								
	Potencia Instalada (kW)			Energía Generada (kWh/año)			Proporciones		
R7	Ángulo medianera (α) -25°	Ángulo lejano (β) 65°	Alineado Sur (γ) 0°	Ángulo medianera (α)	Ángulo lejano (β)	Alineado Sur (γ)	β/α	α/γ	β/γ
275W	10.175	11.322	9.889	16,075.16	16,075.00	16,076.54	11.27%	2.89%	14.49%
275L	8.800	9.791	8.551	13,902.84	13,901.28	13,901.35	11.26%	2.91%	14.50%
330W	10.230	11.383	9.942	16,162.05	16,161.61	16,162.70	11.27%	2.90%	14.49%
330L	6.930	7.712	6.735	10,948.49	10,949.52	10,949.08	11.28%	2.90%	14.51%
400W	12.000	13.352	11.661	18,958.42	18,957.20	18,957.27	11.27%	2.91%	14.50%
400L	8.400	9.347	8.163	13,270.89	13,270.89	13,270.58	11.27%	2.90%	14.50%

Tabla 6. Comparación de potencias instaladas al variar el ángulo de azimut y sus proporciones.

La Tabla 6 también incluye la proporción de las potencias pico instaladas entre los tres valores posibles del ángulo de azimut (β/α , α/γ y β/γ). De la figura se puede ver que las proporciones no dependen de la configuración del panel fotovoltaico.

También se observa que si el arreglo fotovoltaico está perfectamente alineado con el Sur se necesita la menor potencia pico instalada y cuando está más alejado (el ángulo de azimut igual a β) se requiere la mayor cantidad de potencia pico instalada para generar la misma cantidad de energía siendo en este caso un 14,50%.

Otro aspecto importante es la poca variación entre el ángulo de medianera α y el ángulo γ , para este caso se tiene un valor igual a 2,90 %, lo cual equivale para la configuración 400 W, por ejemplo, a 339 W, poco menos de un panel fotovoltaico.

Al promediar todas las proporciones de ángulos de azimut para un mismo ángulo medianera y ángulo de inclinación se puede obtener una serie de curvas que describen el comportamiento de las distintas proporciones. La Figura 34 muestra la relación β/α para distintos ángulos de inclinación. En esta figura se puede observar variaciones desde el 2% hasta un valor extremo de 34 %.

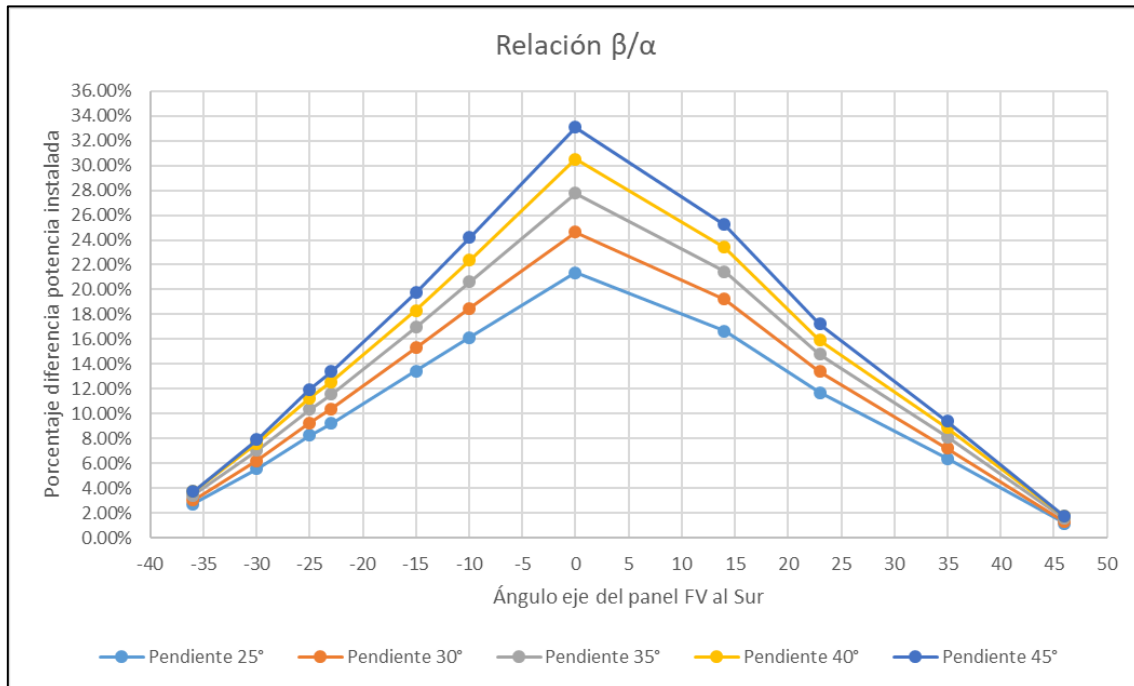


Figura 34. Conjunto de curvas para la relación β/α en función del ángulo azimut del panel.

De la Figura 34 se puede observar principalmente dos cosas:

1. Para un ángulo de pendiente constante, la relación β/α tiene un comportamiento simétrico en torno a los 0° lo cual se explica con la trayectoria del Sol y la radiación directa, esto es, para un ángulo de azimut positivo se recibe mayor radiación directa durante la tarde que en la mañana y viceversa, así, al final del año, se tiene la misma generación de energía para los ángulos de azimut de misma magnitud, pero diferente signo.

2. Para un ángulo de azimut constante, la relación β/α se incrementa con el ángulo de inclinación del panel lo cual describe la trayectoria del Sol a lo largo del año, es decir, con un ángulo de inclinación mayor y una mala orientación el panel fotovoltaico recibe menos radiación directa y, por ende, genera menos energía. Esta diferencia se reduce a medida que el ángulo de azimut del panel se aleja de los 0° y alcanza una magnitud de 45° lo cual quiere decir que los ángulos α y β tienen el mismo valor, pero diferente signo y tienen el comportamiento descrito en el punto 1).

La Figura 35 muestra la relación α/γ para distintos ángulos de inclinación. En esta figura se observan variaciones desde un 0% (ángulo de azimut igual a 0) hasta valores del 7% (ángulos de azimut y de inclinación de 45°). Este comportamiento confirma que la mejor orientación es aquella que está alineada con el Sur, aunque la diferencia no es tan grande.

Por otro lado, para un mismo ángulo de azimut, se tiene que la variación aumenta con el ángulo de inclinación y esto es ocasionado por la trayectoria del Sol a lo largo del año y, por ende, la cantidad de radiación directa que recibe el panel fotovoltaico.

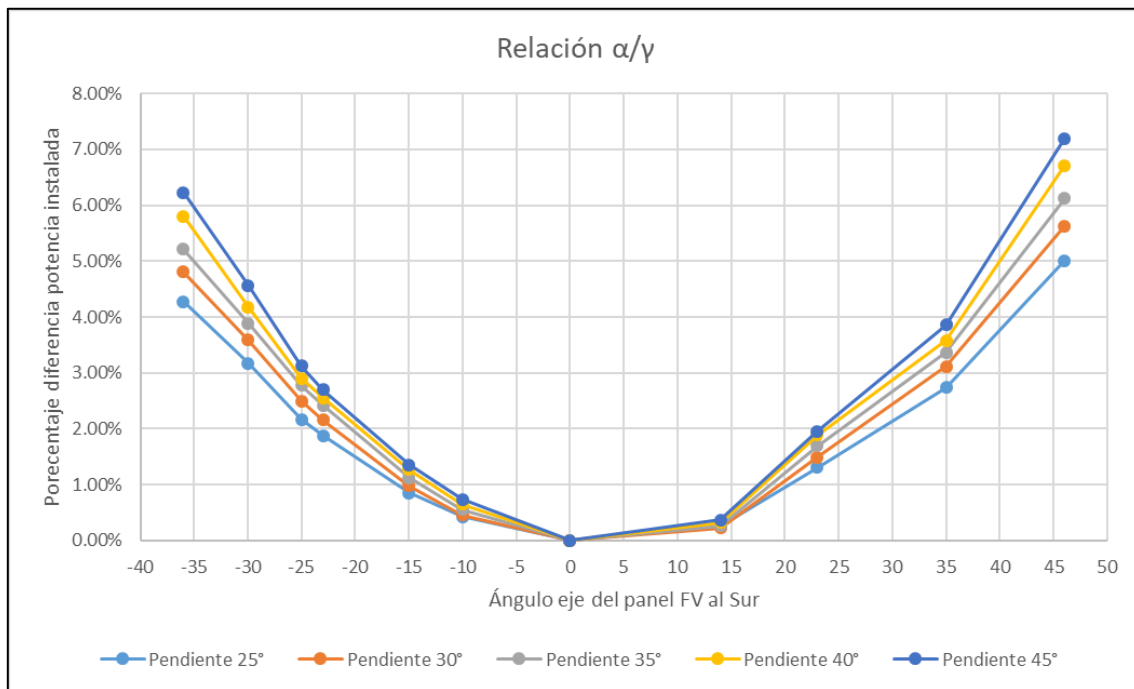


Figura 35. Conjunto de curvas para la relación α/γ en función del ángulo de azimut del panel.

La Figura 36 muestra el conjunto de curvas de la relación β/γ para distintos ángulos de inclinación. La variación abarca un rango desde 6% hasta 32%. De esta figura cabe destacar la variación que se tiene a un ángulo de azimut igual a $\pm 45^\circ$, en este valor la variación tiene el mismo valor que su semejante de la Figura 35 ya que tanto α como β son iguales y tienen el comportamiento descrito en el punto 1) anteriormente.

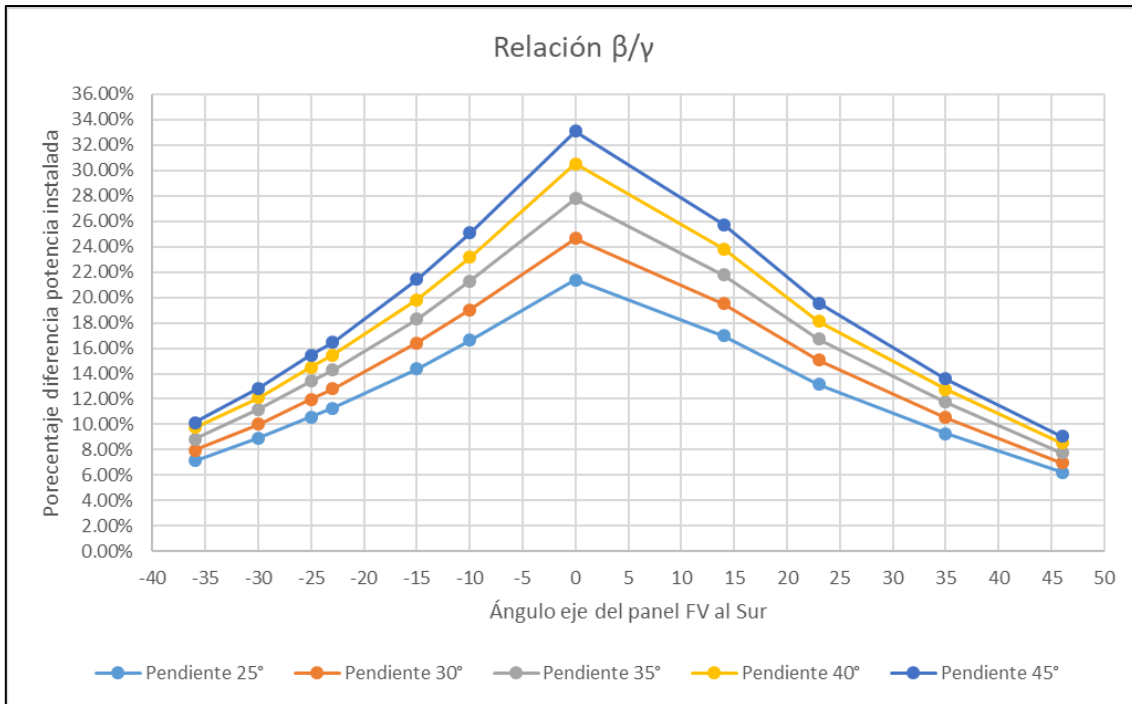


Figura 36. Conjunto de curvas para la relación β/γ en función del ángulo de azimut del panel.

En la metodología se hace uso de la Figura 34 para obtener las relaciones de conversión de potencia de un arreglo con orientación β a uno equivalente con orientación α mediante el uso de las ecuaciones de tendencia para cada ángulo de inclinación. Al separar cada línea de la Figura 34 y obtener dicha ecuación, da como resultado el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$P_{eq@ \alpha, 25^\circ} = \frac{P_{k@ \beta, 25^\circ}}{-4,855E-10\alpha^5 + 6,068E-08\alpha^4 + 3,344E-07\alpha^3 - 1,978E-04\alpha^2 + 6,782E-04\alpha + 1,196} \quad (9)$$

$$P_{eq@ \alpha, 30^\circ} = \frac{P_{k@ \beta, 30^\circ}}{-5,486E-10\alpha^5 + 7,218E-08\alpha^4 + 3,054E-07\alpha^3 - 2,320E-04\alpha^2 + 8,582E-04\alpha + 1,226} \quad (10)$$

$$P_{eq@ \alpha, 35^\circ} = \frac{P_{k@ \beta, 35^\circ}}{-6,449E-10\alpha^5 + 8,295E-08\alpha^4 + 3,880E-07\alpha^3 - 2,621E-04\alpha^2 + 9,376E-04\alpha + 1,253} \quad (11)$$

$$P_{eq@ \alpha, 40^\circ} = \frac{P_{k@ \beta, 40^\circ}}{-7,047E-10\alpha^5 + 9,227E-08\alpha^4 + 4,041E-07\alpha^3 - 2,889E-04\alpha^2 + 1,036E-03\alpha + 1,276} \quad (12)$$

$$P_{eq@ \alpha, 45^\circ} = \frac{P_{k@ \beta, 45^\circ}}{-7,747E-10\alpha^5 + 1,014E-07\alpha^4 + 4,537E-07\alpha^3 - 3,168E-04\alpha^2 + 1,144E-03\alpha + 1,299} \quad (13)$$

Donde:

$P_{eq@ \alpha, 25^\circ}$ ($30^\circ, 35^\circ, \dots$) = Potencia equivalente en términos del ángulo de medianera α de la potencia instalada con ángulo de azimut β y un ángulo de inclinación $\theta = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ (kW).

$P_{k@ \beta, 25^\circ}$ ($30^\circ, 35^\circ, \dots$) = Potencia pico instalada con ángulo de azimut β y un ángulo de inclinación $\theta = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ (kW).

CASO II: VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN CON ÁNGULO DE AZIMUT CONSTANTE

La Tabla 7 muestra un ejemplo de un edificio en el cual se determina la potencia instalada necesaria si se tiene un ángulo de azimut igual a -30° para generar la misma cantidad de energía anual al variar el ángulo de inclinación desde 25° hasta 45° en incrementos de 5° así como las proporciones de potencias pico instaladas respectivas ($30^\circ/25^\circ$, $35^\circ/25^\circ$, $40^\circ/25^\circ$, etc.).

R10	Ángulo medianera (α) -30°																			
	Potencia Instalada (kW)					Energía Generada (kWh/año)					Proporciones									
	25°	30°	35°	40°	45°	25°	30°	35°	40°	45°	30°/25°	35°/25°	40°/25°	45°/25°	35°/30°	40°/30°	45°/30°	40°/35°	45°/35°	45°/40°
275W	19.250	19.120	19.077	19.154	19.358	29.860.12	29.859.76	29.860.48	29.860.09	29.859.50	99.32%	99.10%	99.50%	100.56%	99.78%	100.18%	101.24%	100.40%	101.47%	101.07%
275L	17.325	17.208	17.169	17.239	17.423	26.874.11	26.873.78	26.873.96	26.874.70	26.874.79	99.32%	99.10%	99.50%	100.57%	99.77%	100.18%	101.25%	100.41%	101.48%	101.07%
330W	17.820	17.700	17.660	17.731	17.920	27.641.94	27.642.14	27.642.50	27.641.70	27.641.41	99.33%	99.10%	99.50%	100.56%	99.77%	100.18%	101.24%	100.40%	101.47%	101.07%
330L	17.490	17.372	17.333	17.403	17.589	27.130.05	27.129.90	27.130.66	27.130.37	27.130.84	99.33%	99.10%	99.50%	100.57%	99.78%	100.18%	101.25%	100.40%	101.48%	101.07%
400W	20.400	20.262	20.216	20.298	20.515	31.643.97	31.643.22	31.643.31	31.643.52	31.644.16	99.32%	99.10%	99.50%	100.56%	99.77%	100.18%	101.25%	100.41%	101.48%	101.07%
400L	22.400	22.249	22.198	22.288	22.526	34.746.32	34.746.33	34.745.65	34.745.83	34.746.11	99.33%	99.10%	99.50%	100.56%	99.77%	100.18%	101.24%	100.41%	101.48%	101.07%

Tabla 7. Ejemplo de comparación de la potencia instalada al variar el ángulo de inclinación y sus proporciones.

De manera similar a la Tabla 6, las proporciones no dependen de la potencia y colocación del panel fotovoltaico. También al comparar las potencias pico instaladas, el ángulo de inclinación que requiere la menor potencia instalada es el de 35° que es un ángulo que se acerca a la latitud de la ciudad de Valencia, lo cual comprueba el concepto de que el ángulo de inclinación óptimo es aproximadamente igual a la latitud del sitio. Asimismo, el ángulo que requiere la mayor potencia instalada es el de 45° .

Al promediar todas las proporciones de ángulos de inclinación para un mismo ángulo medianera se puede obtener una serie de curvas que describen el comportamiento de las distintas proporciones. La Figura 37 muestra las proporciones de todos los ángulos de inclinación con respecto al ángulo de 25° en función del ángulo azimut del panel fotovoltaico. En esta figura se puede observar variaciones desde 98,30 % hasta 101,10 %.

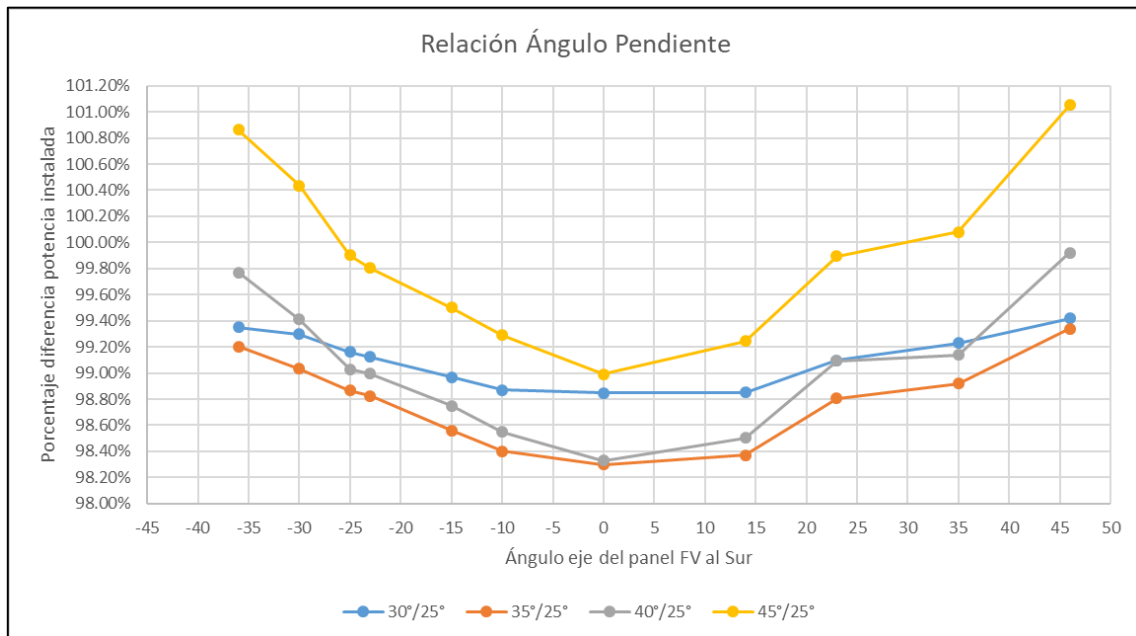


Figura 37. Conjunto de curvas para las proporciones de potencias de los ángulos de inclinación con respecto al ángulo de 25° .

Un aspecto importante de la Figura 37 es notar que todos los ángulos de inclinación mayores a 25° requiere menos potencia instalada para generar la misma cantidad de energía anual teniendo como límite un ángulo de inclinación de 45° y un ángulo de azimut de $\pm 30^\circ$. Debido a la trayectoria del sol en Valencia, el ángulo de incidencia de la radiación directa es más próximo a los 90° cuando se inclina más el ángulo de inclinación del panel hasta los 35° aproximadamente, a partir de ese punto el ángulo de incidencia se aleja de los 90° pero su rendimiento no es tan malo como el caso del ángulo de inclinación de 25°.

Finalmente, el conjunto de curvas muestra que la inclinación del panel fotovoltaico tiene un efecto mucho menor que el cambio de orientación (azimut) del panel al comparar los porcentajes de variación de las Figura 35 y Figura 37.

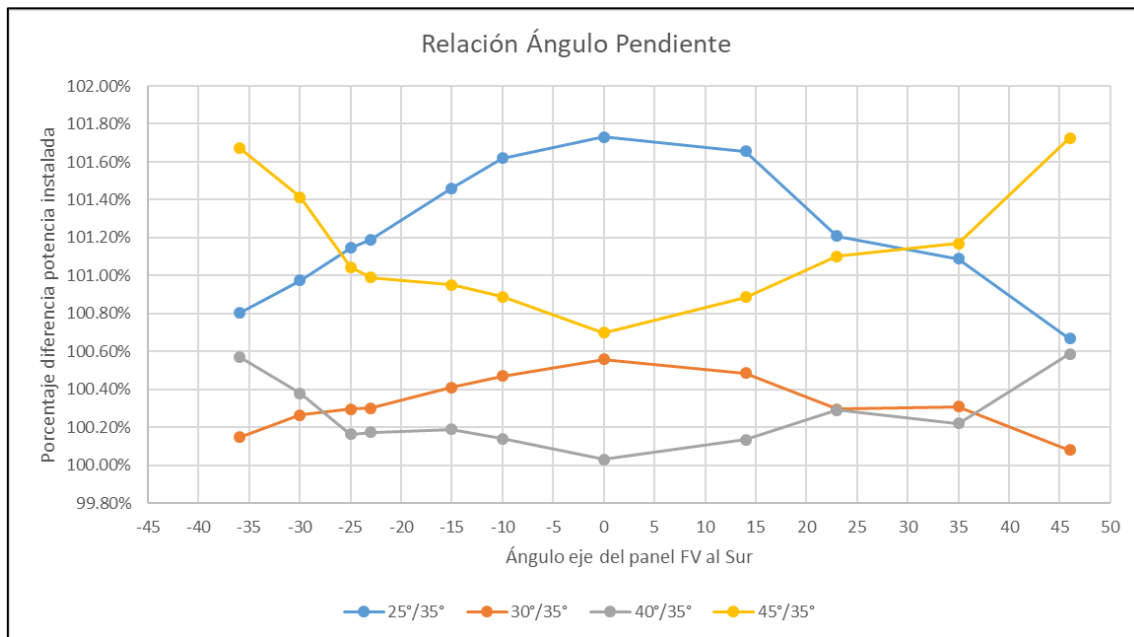


Figura 38. Conjunto de curvas para las proporciones de potencias de los ángulos de inclinación con respecto al ángulo 35°.

La Figura 38 muestra el conjunto de curvas de las proporciones de todos los ángulos de inclinación con respecto al ángulo "óptimo" de 35° para el caso de la ciudad de Valencia. El aspecto más importante de esta figura es que todos los valores de las proporciones están por arriba del 100% lo cual confirma que el ángulo de 35° es en efecto el ángulo óptimo, no obstante, el comportamiento de las curvas es más caótico y más difícil de interpretar. Como consecuencia, las ecuaciones de tendencia de estas curvas no tendrán un coeficiente de determinación tan alto, y por ende, es menos confiable que sus semejante de la Figura 37.

Por lo tanto, para efectos de este trabajo, se utilizan el conjunto de curvas de la Figura 37 en la metodología y sus ecuaciones de tendencia respectivas que se describen a continuación:

$$P'_{eq@α,25°} = \frac{P_{k@α,30°}}{-1,333E-09α^4 + 1,076E-08α^3 + 5,647E-06α^2 - 2,479E-05α + 0,988} \quad (14)$$

$$P'_{eq@α,25°} = \frac{P_{k@α,35°}}{-1,776E-09α^4 + 1,259E-08α^3 + 8,685E-06α^2 - 3,751E-05α + 0,983} \quad (15)$$

$$P'_{eq@α,25°} = \frac{P_{k@α,40°}}{-2,424E-10α^4 - 3,289E-08α^3 + 9,148E-06α^2 - 1,496E-05α + 0,984} \quad (16)$$

$$P'_{eq@α,25°} = \frac{P_{k@α,45°}}{-1,623E-10α^4 - 4,650E-08α^3 + 1,179E-05α^2 - 1,818E-05α + 0,991} \quad (17)$$

Donde:

$P_{k@α,30°}$ (35°, 40°, 45°) = Potencia pico instalada con ángulo de azimut $α$ y un ángulo de inclinación $θ = 30°, 35°, 40°, 45°$ (kW).

$P'_{eq@α,25°}$ = Potencia equivalente con un ángulo de azimut $α$ y un ángulo de inclinación $θ$ de 25° (kW).

2.5 CONSIDERACIÓN ESPECIAL A LA ALINEACIÓN DEL ARREGLO DE PANELES CON EL SUR

En la instalación de paneles fotovoltaicos, es muy común que se instalen los paneles fotovoltaicos siguiendo el perfil de la cubierta, tal como se muestra en la Figura 39.



Figura 39. Instalación típica de paneles fotovoltaicos en una cubierta.

Asimismo, es común encontrarse con edificios con diferentes orientaciones y que muchos no estén alineados perfectamente con el Sur, orientación idónea para colocar un panel fotovoltaico ya que se recibe la mayor cantidad de radiación solar, por ende, se pierde cierto potencial de generación eléctrica. No obstante, si se alinearan los paneles fotovoltaicos con el Sur en una cubierta mal orientada, no se aprovecharía eficientemente toda la superficie de la misma y se instalaría una potencia menor que no generaría probablemente una cantidad de energía mayor a la que genera un arreglo mal orientado, tal como se muestra en la Figura 40.

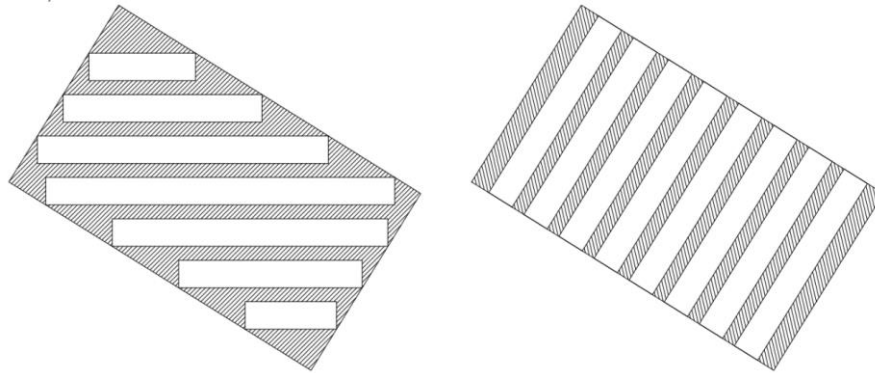


Figura 40. Colocación de paneles solares alineados al Sur en un edificio mal orientado.

La Figura 41 muestra que para el caso extremo de un edificio desviado 45° con respecto al Sur, los paneles fotovoltaicos alineados con el perfil del edificio generan la misma cantidad de energía que los paneles bien alineados cuando la potencia pico instalada mal orientada es 1,07 veces la potencia pico bien alineada cuando se tiene una inclinación de 45°.

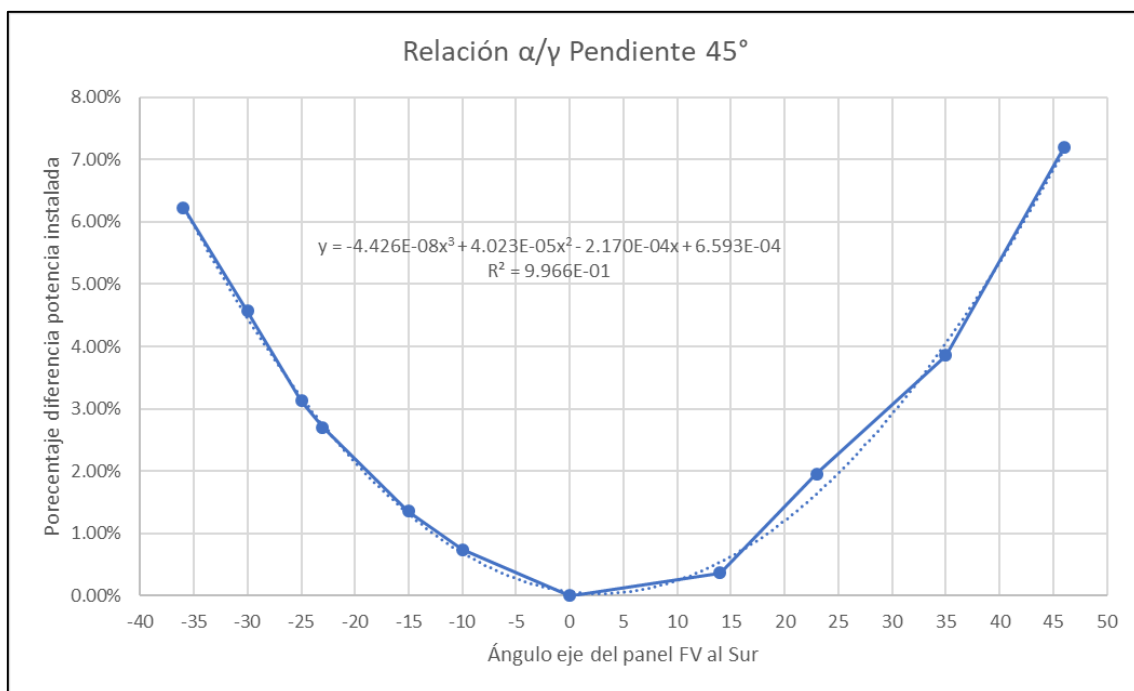


Figura 41. Comparación de potencia pico instalada de paneles mal orientados y bien orientados al Sur.

Por lo tanto, en este trabajo solo se considera la instalación de paneles fotovoltaicos a lo largo del perfil de la cubierta del edificio por tres motivos:

1. El aumento importante de la complejidad para determinar la potencia pico instalada de paneles fotovoltaicos alineados con el Sur en edificios con diferentes orientaciones.
2. La reducción considerable de la superficie ocupada por paneles solares alineados con el Sur.
3. La poca variación de energía generada con paneles no tan bien orientados.

2.6 METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS

La metodología para determinar el arreglo de paneles fotovoltaicos para un rectángulo caracterizado dado (largo, ancho y orientación) consiste, de forma general, en los siguientes pasos:

1. Para cada potencia (275 W, 330 W y 400 W), posición (W y L) y ángulo de inclinación θ (25°, 30°, 35°, 40° y 45°) determinar la potencia pico instalada máxima cuando su eje coincide con el ángulo de medianera α del elemento rectángulo.
2. Para cada potencia (275 W, 330 W y 400 W), posición (W y L) y ángulo de inclinación θ (25°, 30°, 35°, 40° y 45°) determinar la potencia pico instalada máxima cuando su eje coincide con el ángulo complementario β del ángulo de medianera α del elemento rectángulo.
3. Para cada ángulo de inclinación θ (25°, 30°, 35°, 40° o 45°) y ángulo del azimut (α o β), comparar las potencias pico instaladas y obtener el arreglo con la mayor magnitud. Ver Figura 42 y Figura 43.

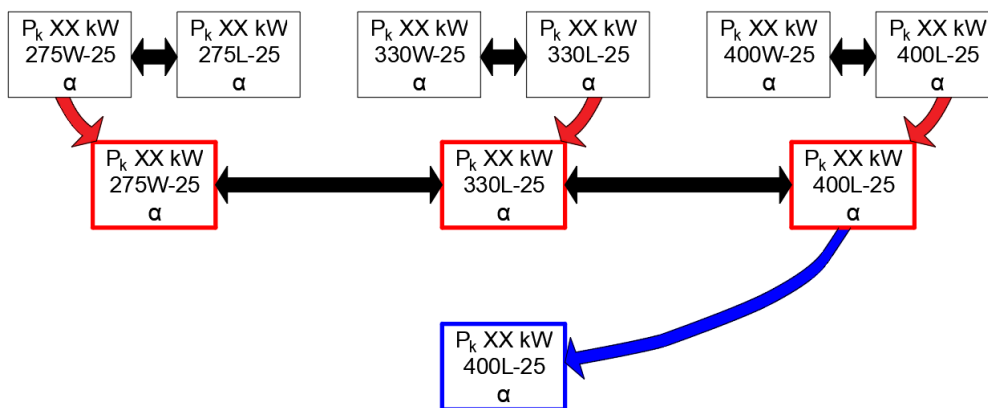


Figura 42. Potencia pico instalada máxima para cada potencia, posición, ángulo de inclinación θ de 25° y orientación α .

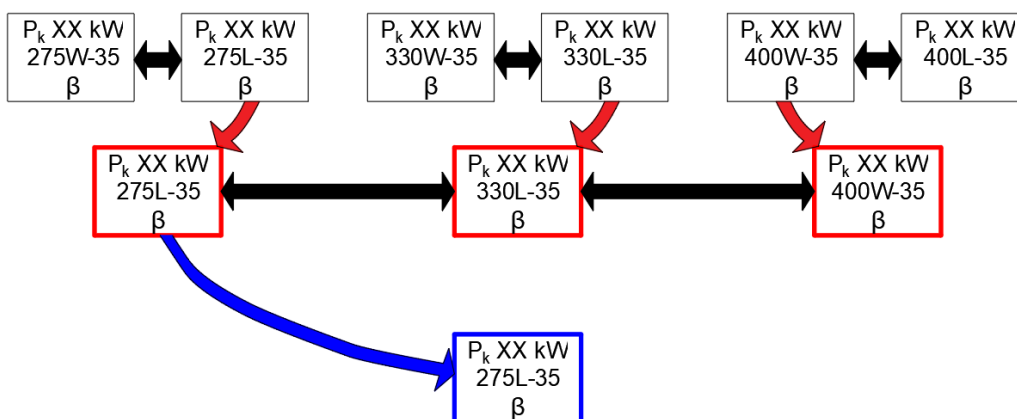


Figura 43. Potencia pico instalada máxima para cada potencia, posición, ángulo de inclinación θ de 35° y orientación β .

- Para cada arreglo seleccionado del punto anterior y ángulo de inclinación θ (25, 30°, 35°, 40° o 45°) comparar las potencias pico instaladas equivalentes, esto es, transformar las potencias con ángulo de azimut igual a β a su equivalente con ángulo de azimut igual a α por medio de las Ecuaciones (9) - (13), y obtener el arreglo con la mayor magnitud. Ver Figura 44.

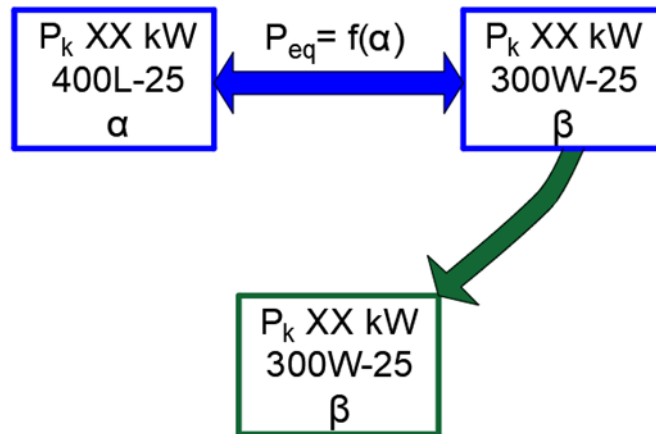


Figura 44. Potencia pico instalada máxima para un ángulo de inclinación θ de 25° al comparar los ángulos de azimut.

- Para cada arreglo seleccionado del punto anterior, comparar las potencias pico instaladas equivalentes, esto es, transformar las potencias con ángulos de inclinación diferentes a 25° a su equivalente con ese ángulo de inclinación mediante las Ecuaciones (14) - (17), y obtener el arreglo con la mayor magnitud. Este último será el arreglo óptimo para el rectángulo caracterizado dado. Ver Figura 45.

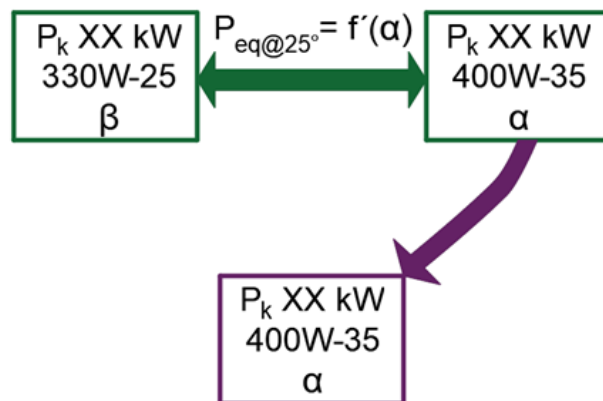


Figura 45. Potencia pico instalada máxima al considerar todos los arreglos.

El esquema general de la metodología se muestra en la Figura 46.

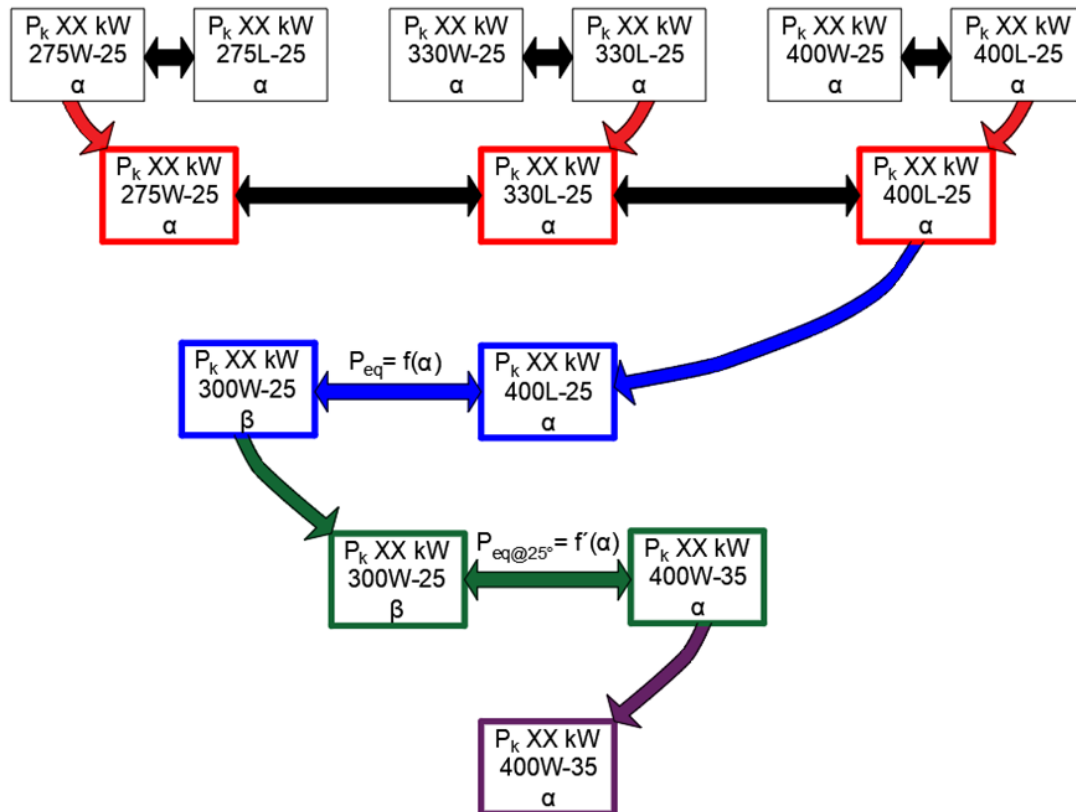


Figura 46. Esquema general de la metodología de optimización.

2.7 EMISIÓN DE CONTAMINANTES

Aunque los sistemas fotovoltaicos no emiten contaminantes durante su fase operativa, indirectamente, si lo hacen durante la fase de construcción, mantenimiento y desmantelamiento. También no solamente se trata de los paneles fotovoltaicos, sino el sistema de soporte, inversor, instalación eléctrica, transporte, etc. Para determinar la emisión de contaminantes de un sistema fotovoltaico se realiza una evaluación de impacto ambiental (EIA, en inglés) del ciclo de vida de dicho sistema.

2.7.1 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

El análisis del ciclo de vida (LCA, en inglés) es una metodología reglamentada en la ISO 14040:2006 que evalúa los impactos ambientales del ciclo de vida de un producto y se divide en 4 etapas (25):

1. Alcance y objetivos del estudio.
2. Análisis de inventario.
3. Evaluación de impacto ambiental.
4. Interpretación.

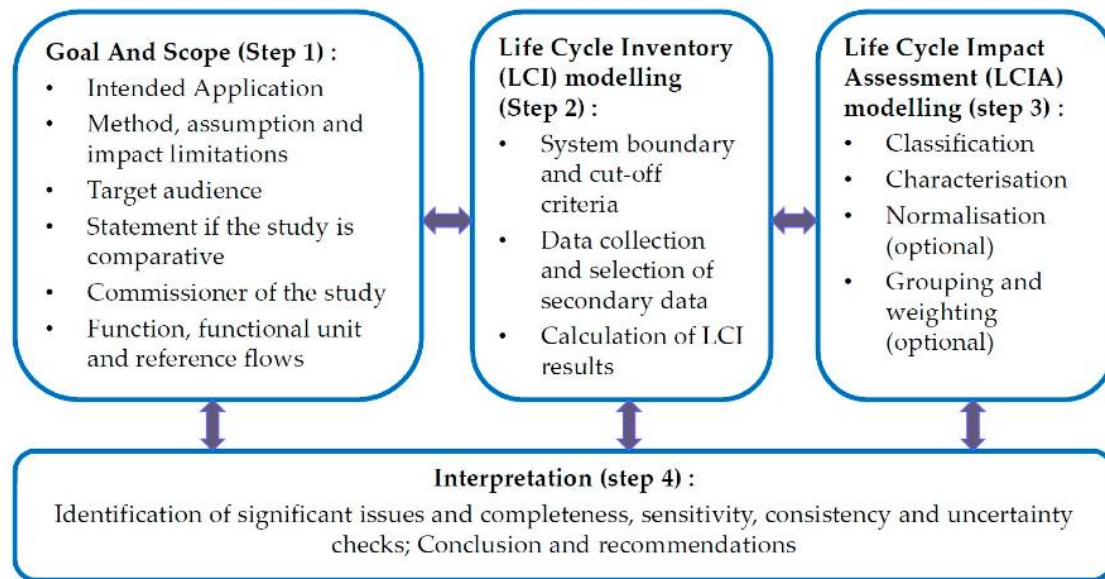


Figura 47. Etapas de un análisis de ciclo de vida (LCA) según ISO 14040:2006 (25).

ALCANCE Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

En este trabajo se analiza una instalación fotovoltaica en una cubierta plana que cuenta con un sistema de soporte, inversores, instalación eléctrica y paneles fotovoltaicos policristalinos y tiene la intención de proporcionar información sobre el impacto ambiental en cuestión de gases de efecto invernadero únicamente (atendiendo a las directrices y planes energéticos generados por la Unión Europea) a los diseñadores de instalaciones de este tipo en las primeras etapas de estimación. Asimismo, al ámbito se considera desde la extracción de materia prima, producción, transporte, operación hasta la etapa de desmantelamiento del sistema ya que se considera que las técnicas de reciclaje y disposición final de los distintos componentes del sistema cambiarán en los próximos 15 años. Para este estudio se utiliza el software SimaPro que es un programa computacional especializado en LCA siendo utilizado más de 30 años en ambientes industriales y académicos en más de 80 países.

La unidad funcional es una instalación completa de paneles fotovoltaicos en una cubierta plana, con una potencia nominal de 3 kW_p y que incluye inversor, estructura portante y cableado con una vida útil de 15 años.

Para la instalación a analizar se considera lo siguiente:

- Para una aplicación más general, los paneles fotovoltaicos pueden ser producidos en cualquier parte del mundo ya que el criterio más importante en su elección es la relación calidad/precio y no tanto la cercanía del proveedor ya que el transporte no tiene mucha influencia en el precio final del producto.
- Los paneles fotovoltaicos son policristalinos ya que son los más comerciales con una potencia pico instalada de 3 kW_p que es una potencia media para las cubiertas planas de edificios.
- Se considera un reemplazo de paneles fotovoltaicos del 2% del total durante la vida útil de la instalación (15 años) y un 1% de pérdida en su producción debido a daños en su manipulación durante la instalación.

- El inversor es de 3 kW y tiene una vida útil de 15 años, por ende, no necesita reemplazarse.
- El sistema de soporte se compone de estructuras y perfiles de aluminio.
- La instalación eléctrica consiste del sistema de pararrayos, cableado en la zona de paneles fotovoltaicos, caja de fusibles, cableado de los paneles al inversor y del inversor al medidor eléctrico.
- La energía eléctrica necesaria para la instalación y desmantelamiento del sistema fotovoltaico.

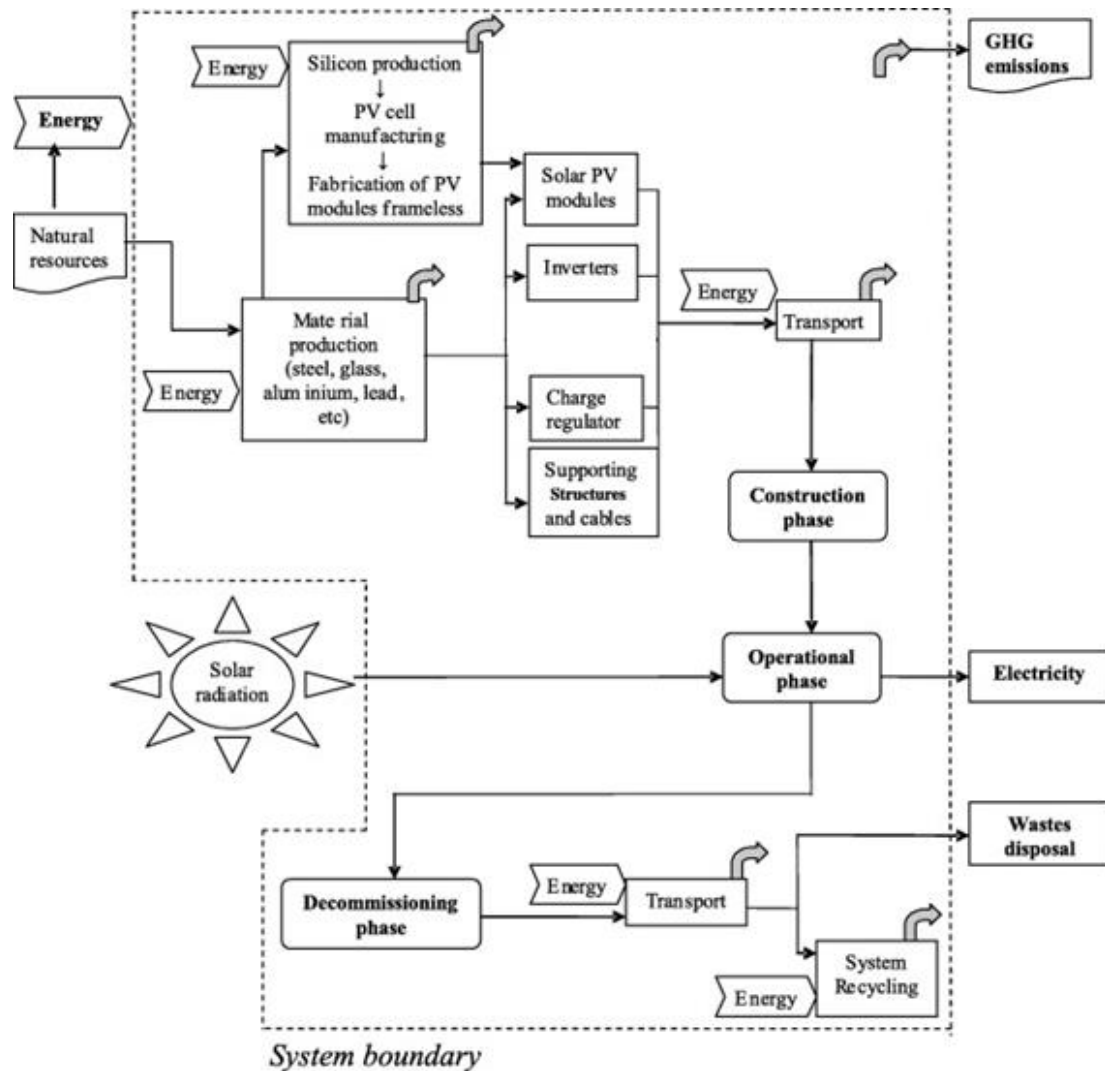


Figura 48. Delimitación típica de un sistema fotovoltaico para un LCA (26).

ANÁLISIS DEL INVENTARIO

Para la etapa de análisis de inventario, se utiliza la base de datos ECOINVENT 3.6 que tiene información de numerosos sectores como energético, producción, transporte, producción de metales, entre otros. Es una base de datos que consiste en más de 10,000 hojas de datos interconectados que describen el inventario (entradas y salidas) del ciclo de vida de un proceso. Además, se considera el modo “Asignación en el punto de sustitución por unidad” ya que se desea considerar los efectos de proporcionar material y productos a procesos secundarios (por ejemplo, el reciclaje), distinguir el impacto ambiental de los componentes de la instalación y se hace la suposición de que los recursos de entrada no escasean. Finalmente, se consideran todas las etapas de la Figura 48 (con excepción del reciclado y disposición final), pero solo en relación a emisiones de gases de efecto invernadero.

EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

De acuerdo a la ISO 14040 esta tercera etapa consta de 4 pasos: identificación, caracterización, normalización y ponderación (ver Figura 47). Actualmente, diversos equipos de investigación proponen métodos que ya implementan este procedimiento, por ejemplo, IMPACT 2002+, EPS 2015d, etc. Como en este trabajo es de especial interés el impacto ambiental de los gases de efecto invernadero se utiliza el método IPCC 2013 GWP 100a el cual identifica los efluentes del sistema que influyen en el cambio climático y los caracteriza por medio de factores. La Figura 49 muestra los factores de caracterización de diversas sustancias químicas. Este método toma en cuenta la cantidad de energía que puede atrapar una determinada sustancia en comparación al dióxido de carbono en un periodo de 100 años. Por ejemplo, por cada kilogramo de halón 1301 (trifluor-bromo-metano) que se emita causa el mismo impacto que lo harían 6.290 kg de CO₂. Cabe mencionar que este método no utiliza normalización ni ponderación.

Methane, biogenic	000074-82-8	27.75	kg CO2 eq / kg
Methane, bromo-, Halon 1001	000074-83-9	2	kg CO2 eq / kg
Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	000353-59-3	1750	kg CO2 eq / kg
Methane, bromodifluoro-, Halon 1201	001511-62-2	376	kg CO2 eq / kg
Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	000075-63-8	6290	kg CO2 eq / kg
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	000075-45-6	1760	kg CO2 eq / kg
Methane, chlorotrifluoro-, CFC-13	000075-72-9	13900	kg CO2 eq / kg
Methane, dibromo-	000074-95-3	1	kg CO2 eq / kg
Methane, dibromodifluoro-, Halon 1202	000075-61-6	231	kg CO2 eq / kg
Methane, dichloro-, HCC-30	000075-09-2	9	kg CO2 eq / kg
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	000075-71-8	10200	kg CO2 eq / kg
Methane, dichlorofluoro-, HCFC-21	000075-43-4	148	kg CO2 eq / kg
Methane, difluoro-, HFC-32	000075-10-5	677	kg CO2 eq / kg
Methane, difluoro(fluoromethoxy)-	000461-63-2	617	kg CO2 eq / kg
Methane, difluoro(methoxy)-	000359-15-9	144	kg CO2 eq / kg
Methane, fluoro-, HFC-41	000593-53-3	116	kg CO2 eq / kg
Methane, fluoro(fluoromethoxy)-	000462-51-1	130	kg CO2 eq / kg
Methane, fluoro(methoxy)-	000460-22-0	13	kg CO2 eq / kg
Methane, fossil	000074-82-8	30.5	kg CO2 eq / kg
Methane, land transformation	000074-82-8	30.5	kg CO2 eq / kg

Figura 49. Factores de caracterización de diversas sustancias químicas (SimaPro).

INTERPRETACIÓN

En cuestión de la interpretación, la Figura 50 muestra el impacto ambiental en la emisión de gases de efecto invernadero para la instalación analizada mediante el software SimaPro. A pesar de que no se tiene un componente mayoritario se pueden discernir algunos aspectos, esto es, la extracción y preparación del carbón para su participación en la producción de las obleas de los paneles es el proceso que más impacto tiene con 506 kg CO₂eq incluyendo la energía en forma de calor. Otros de los procesos que más aportan son la producción de etileno que se emplea para la parte posterior de los paneles fotovoltaicos y la producción del cristal de los mismos. En menor medida se encuentra la energía eléctrica utilizada en los procesos de los distintos elementos: carbón, aluminio, silicio, etc.

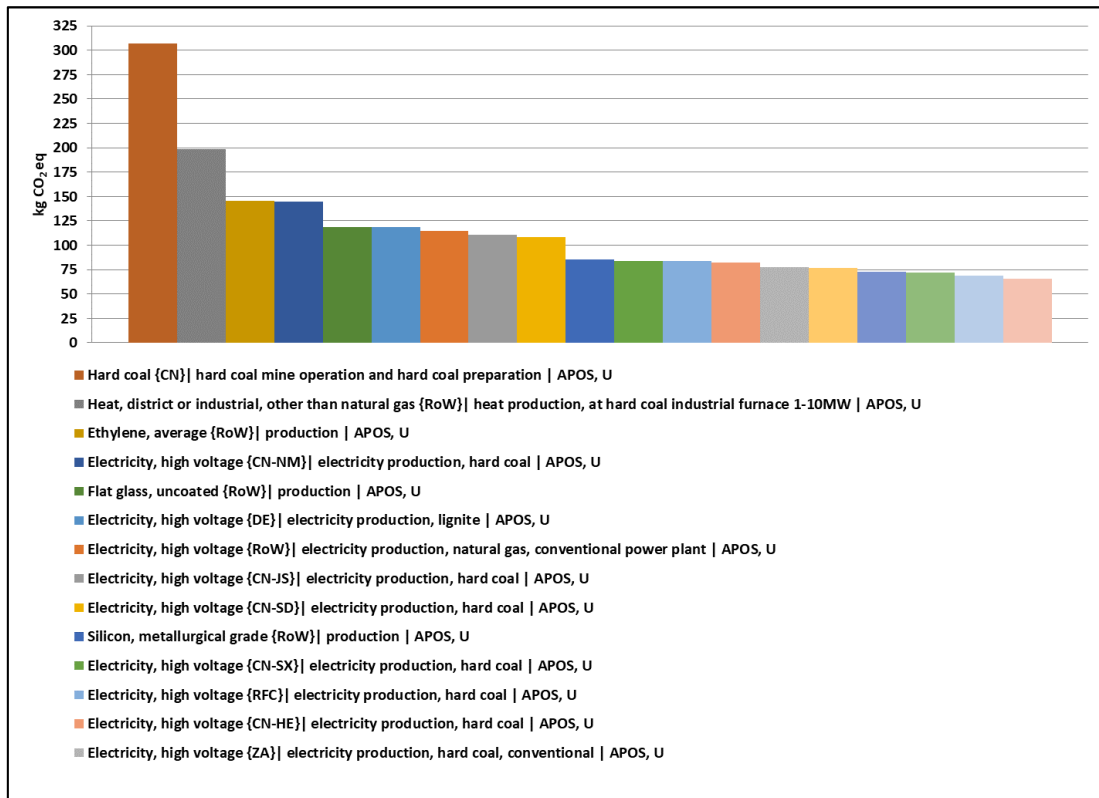


Figura 50. Impacto ambiental por procesos para la instalación considerada.

Los resultados del inventario en la emisión de gases de efecto invernadero del sistema se muestran en la Figura 51. En esta figura se puede observar que la emisión directa de dióxido de carbono es el elemento mayoritario.

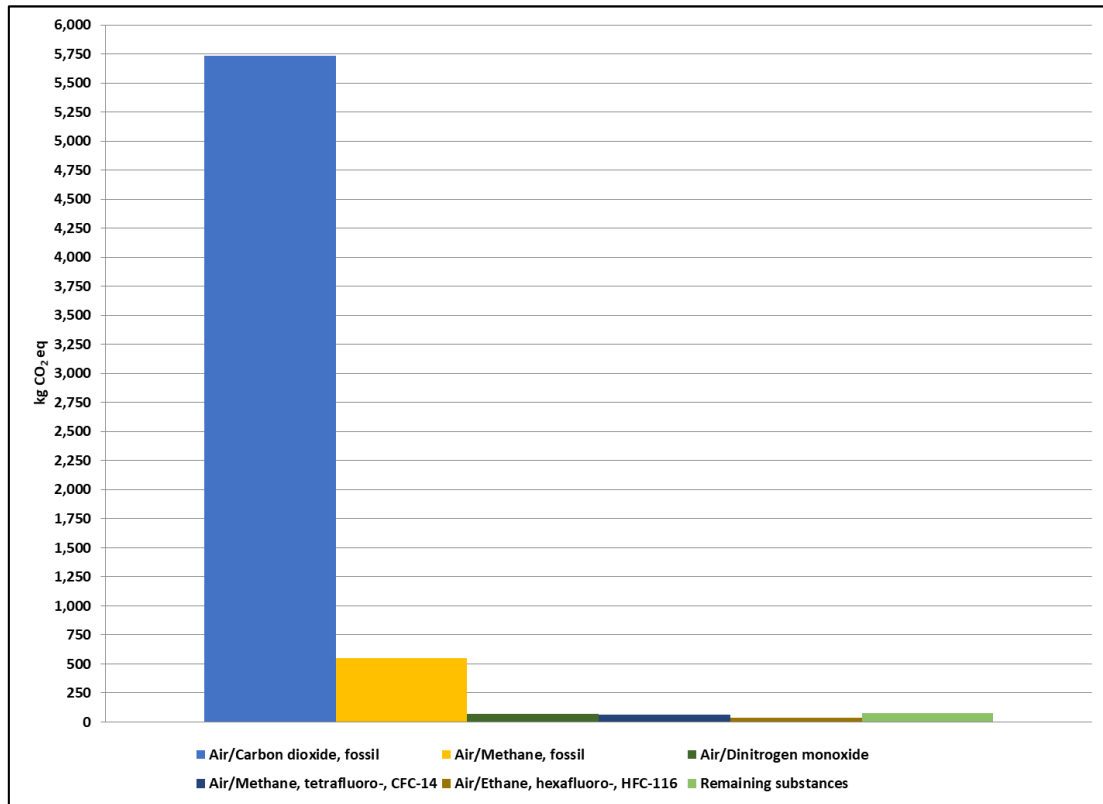


Figura 51. Inventario de las emisiones de partículas al aire del sistema.

La descomposición de la emisión directa de dióxido de carbono por proceso se muestra en la Figura 52. En esta figura se pueden observar distintos procesos en la fabricación de los paneles fotovoltaicos como la producción del cristal y etileno, por ejemplo. A pesar de que no se puede distinguir un proceso mayoritario, la mayoría de los procesos enlistados están relacionados con la extracción y preparación de las obleas de silicio de los paneles fotovoltaicos. Estos resultados sugieren que el componente que más impacto ambiental tiene es el panel fotovoltaico mismo.

Diseño de una Herramienta Automática de Optimización de Instalación de Paneles Fotovoltaicos en Cubiertas de Edificios

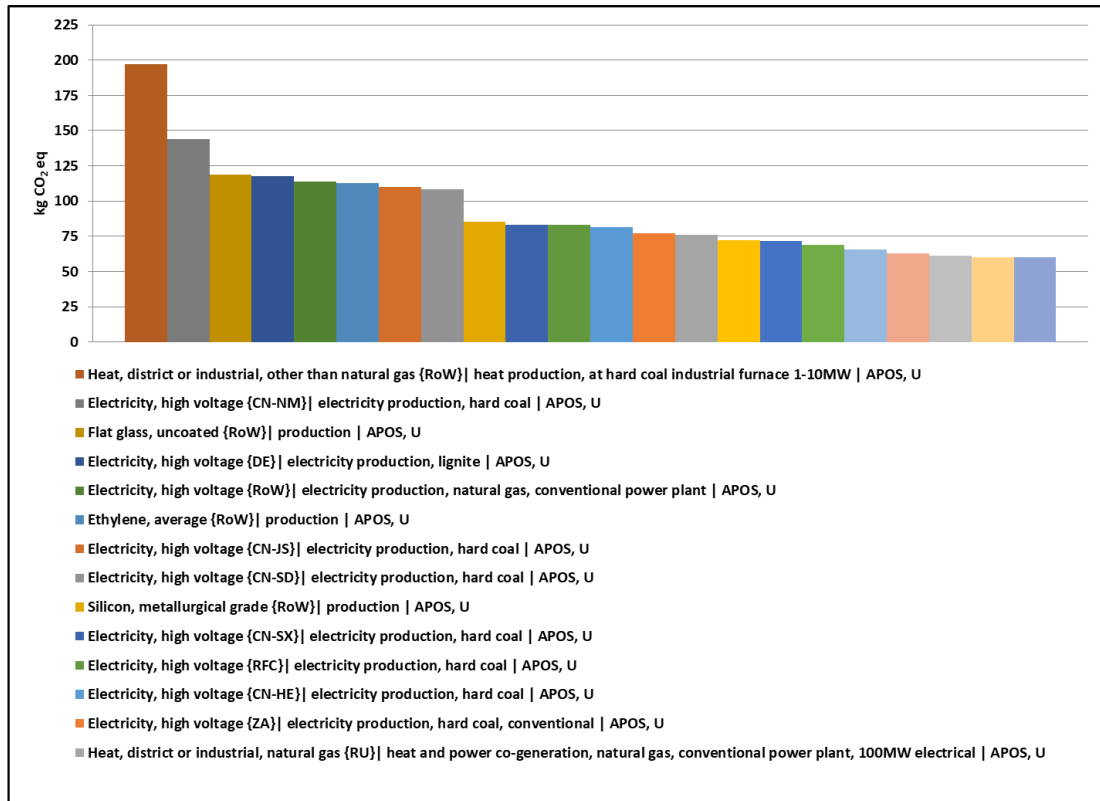


Figura 52. Descomposición de la emisión directa de dióxido de carbono por proceso

2.7.2 APLICACIÓN

Como se mencionó anteriormente se emplea el software SimaPro junto con el método IPCC 2013 GWP 100a V1,03 y la base de datos ECOINVENT 3.6 para obtener la emisión de contaminantes en kg de CO₂ equivalente para un sistema de 3 kW instalado en cubierta plana de edificios con una vida útil de 15 años. La Figura 53 muestra la participación en porcentaje de los distintos elementos del sistema fotovoltaico en su impacto ambiental debido a emisiones de gases de efecto invernadero. De esta figura, cabe destacar que la parte más influyente es el panel fotovoltaico mismo debido a los materiales que lo componen y medio de producción con un 79 %. Asimismo, se tiene que esta instalación genera 6.245 kg de CO₂ equivalente al final de su ciclo de vida considerado.

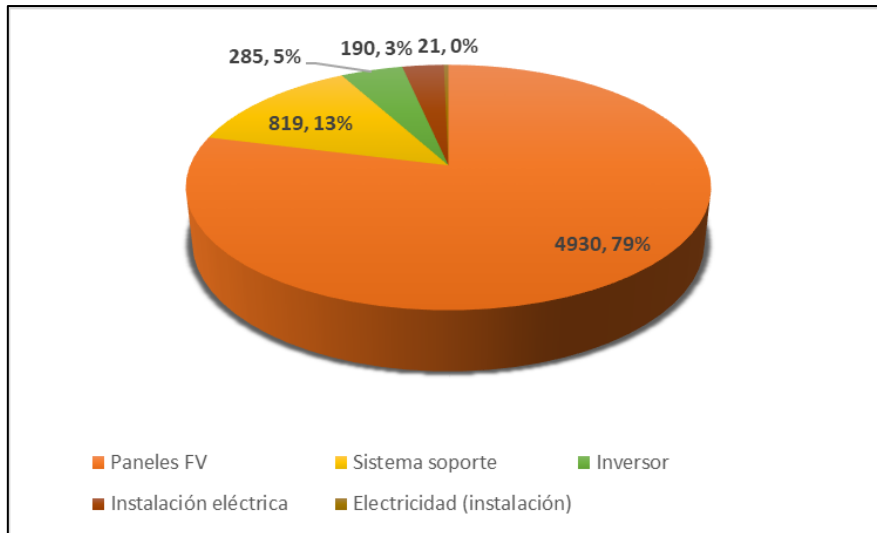


Figura 53. Participación de los distintos elementos en el impacto ambiental de un sistema fotovoltaico.

A continuación, por medio del software en línea PVGIS, se determina la cantidad de energía generada anual de dicha instalación para distintos valores de ángulos de azimut y ángulos de inclinación en una cubierta aleatoria de la ciudad de Valencia. Enseguida, se dividen los kg de CO₂ equivalente del sistema por la cantidad de energía generada anual de cada configuración. La Figura 54 muestra el conjunto de curvas de la relación kg CO₂ eq/kWh para distintos ángulos de inclinación y en función del ángulo de azimut del arreglo fotovoltaico.

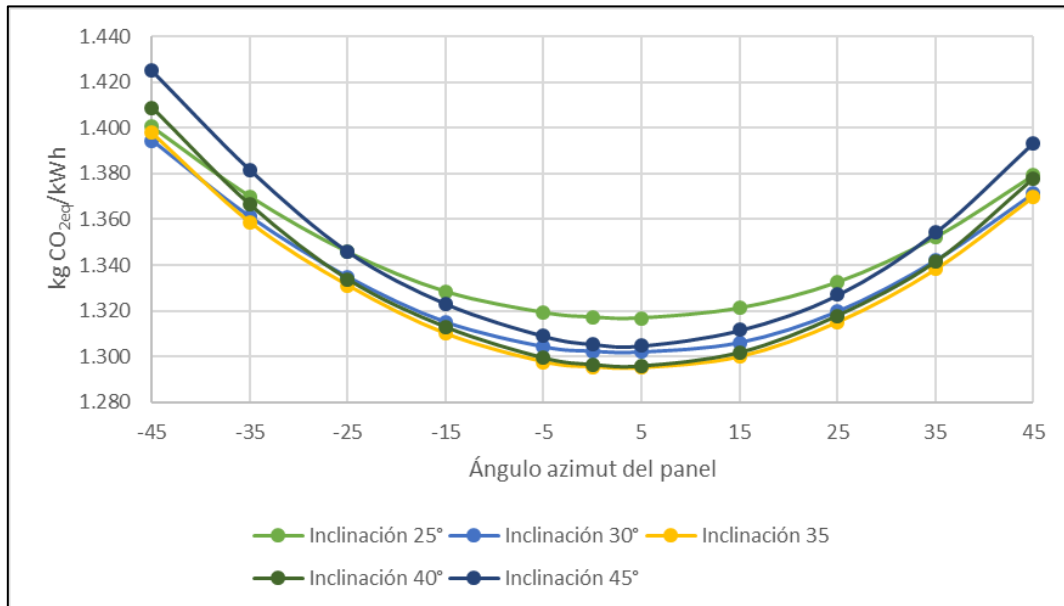


Figura 54. Relación kg CO₂ eq/ kWh para distintos ángulos de inclinación en función del ángulo de azimut.

A partir del conjunto de curvas de la Figura 54 se obtienen una serie de ecuaciones que dependan únicamente del ángulo de azimut para distintos ángulos de inclinación, dichas ecuaciones son:

$$F_{CO_2,eq@25^\circ} = 4E - 05 \alpha^2 - 0,0002 \alpha + 1,3168 \quad (18)$$

$$F_{CO_2,eq@30^\circ} = 4E - 05 \alpha^2 - 0,0003 \alpha + 1,3021 \quad (19)$$

$$F_{CO_2,eq@35^\circ} = 4E - 05 \alpha^2 - 0,0003 \alpha + 1,2953 \quad (20)$$

$$F_{CO_2,eq@40^\circ} = 5E - 05 \alpha^2 - 0,0003 \alpha + 1,2962 \quad (21)$$

$$F_{CO_2,eq@45^\circ} = 5E - 05 \alpha^2 - 0,0004 \alpha + 1,3054 \quad (22)$$

Donde:

$F_{CO_2,eq@25^\circ,30^\circ,35^\circ,40^\circ,45^\circ}$ = Factor de emisiones contaminantes para un arreglo fotovoltaico con un ángulo de inclinación de 25°, 30°, 35°, 40° y 45° con un ángulo de azimut igual a α (kg CO₂ eq/kWh).

Del arreglo óptimo seleccionado de la metodología descrita en la sección anterior se le aplica la ecuación correspondiente de factor de emisiones contaminantes para obtener la cantidad de kg de CO₂ equivalente de todo el ciclo de vida de la instalación fotovoltaico después de obtener su respectiva cantidad de energía generada en un año.

Por otro lado, es necesario determinar la cantidad de kg de CO₂ equivalente a lo largo de la vida útil de la instalación fotovoltaica (15 años) si se consumiera toda la energía de la red eléctrica. La Figura 55 muestra la evolución de kg de CO₂ equivalente por kWh consumido de la red eléctrica española. En esta figura se muestra una tendencia a la baja por la incorporación de energías renovables en la generación de energía eléctrica. Para este trabajo se considera un valor constante de 0,265 kg CO₂ eq/ kWh ya que el pronóstico de dicho valor es complicado de estimar por las diferentes políticas, desarrollo de tecnologías, demanda de energía, etc.

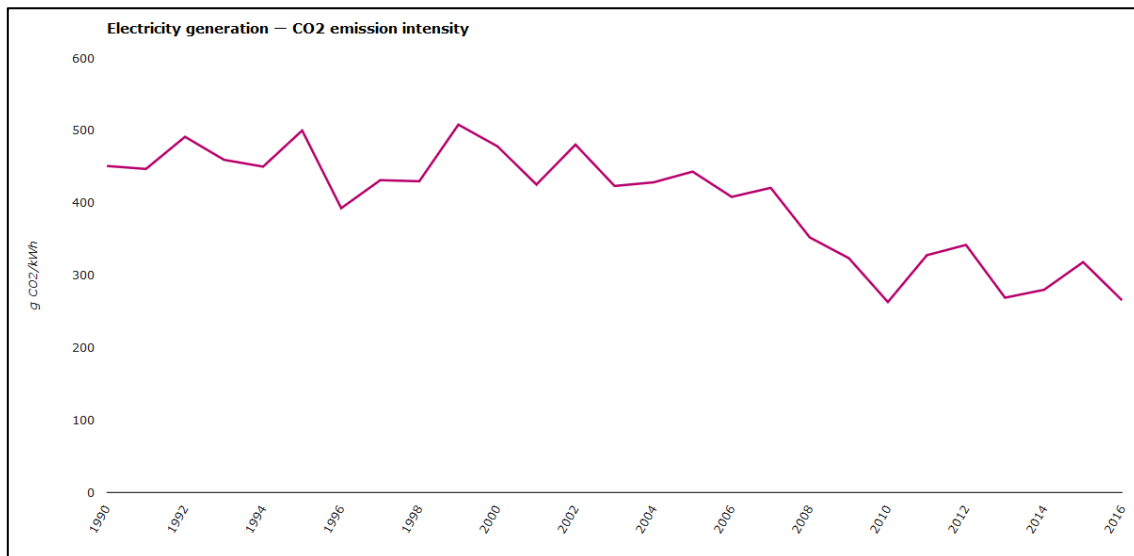


Figura 55. Evolución del valor kg CO₂ eq/kWh de la red eléctrica española (27).

Finalmente, se utiliza la siguiente ecuación para obtener el ahorro de emisiones de contaminantes al final del ciclo de vida de la instalación fotovoltaica seleccionada:

$$kg\ CO_2\ eq = (3,975 - F_{CO_2,eq@θ})kWh_{gen/año} \quad (23)$$

Donde:

$kg\ CO_2\ eq$ = Cantidad de kilogramos de CO_2 equivalente que se ha ahorrado al final del ciclo de vida de la instalación fotovoltaica.

$F_{CO_2,eq@θ}$ = Factor de emisiones contaminantes del arreglo seleccionado que tiene un ángulo de inclinación $θ$ y un ángulo de azimut $α$ ($kg\ CO_2\ eq/kWh$).

$kWh_{gen/año}$ = Energía eléctrica generada anual por el arreglo seleccionado (kWh).

2.8 EJEMPLO DE APLICACIÓN

En esta sección se muestra un ejemplo de aplicación a una sección de área de una cubierta desde el cálculo de potencia pico instalada para todas las configuraciones: potencia (275, 330 y 400 W), colocación (W y L), ángulo de azimut ($α$ y $β$) y ángulos de inclinación (25°, 30°, 35°, 40° y 45°) hasta la selección del arreglo que genere la mayor cantidad de energía anual. Otra característica importante de esta metodología es que supone que la radiación solar es homogénea en todo el rectángulo, es decir, cualquier sombra que se proyecte sobre el área afecta a toda su superficie y no de forma parcial a un segmento.

El edificio seleccionado es el C1 de la Tabla 4 se muestra en la Figura 56 y tiene las siguientes coordenadas: Lat. 39,49102, Long. -0,398914. También se puede observar en la figura que se ha dividido la cubierta en rectángulos que no tendrán ensombrecimientos por obstáculos internos y externos en base a las proyecciones de las sombras que se muestran en la toma aérea. Para este ejemplo se toma el rectángulo I que se muestra en la misma figura.



Figura 56. Rectángulos de la superficie del edificio C1 del ejemplo de aplicación.

El siguiente paso es obtener los parámetros principales del rectángulo, los cuales se muestran en la Figura 57. Las acotaciones están en metros.

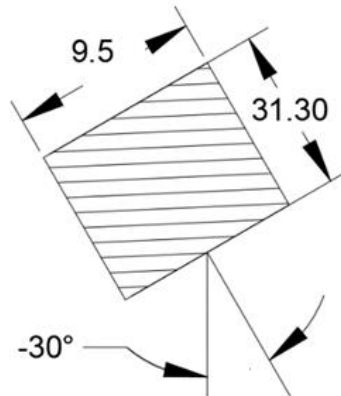


Figura 57. Parámetros principales del rectángulo I.

Al comparar el largo y ancho del rectángulo I con el número máximo de columnas y filas de paneles para cada potencia (275 W, 330 W y 400 W), posición (W y L), ángulo de inclinación (25°, 30°, 35°, 40° y 45°) y orientación (-30° y 60°) y multiplicando el número total de paneles por la potencia correspondiente, se obtienen las potencias pico instaladas para ese rectángulo. La Figura 58 muestra parte del proceso del cálculo.

DATOS		
Longitud	9.5	m
Anchura	31.3	m
Orientación	-30	°

DIMENSIONES PANELES								
275 W			330 W			400 W		
Longitud	1.64	m	Longitud	1.956	m	Longitud	2.015	m
Anchura	0.992	m	Anchura	0.992	m	Anchura	1.002	m
Profundidad	0.035	m	Profundidad	0.04	m	Profundidad	0.04	m
Potencia	0.275	kW	Potencia	0.330	kW	Potencia	0.400	kW

ORIENTACIÓN α						ORIENTACIÓN β											
25°						25°											
275	W	24.750	330	W	23.760	400	W	28.800	275	W	24.750	330	W	29.700	400	W	24.000
	L	22.000		L	21.120		L	25.600		L	24.750		L	24.750		L	30.000
30°						30°											
275	W	22.275	330	W	23.760	400	W	25.200	275	W	24.750	330	W	19.800	400	W	24.000
	L	20.625		L	19.800		L	24.000		L	24.750		L	24.750		L	30.000
35°						35°											
275	W	22.275	330	W	20.790	400	W	25.200	275	W	24.750	330	W	19.800	400	W	24.000
	L	19.250		L	18.480		L	22.400		L	19.800		L	19.800		L	24.000
40°						40°											
275	W	19.800	330	W	20.790	400	W	25.200	275	W	24.750	330	W	19.800	400	W	24.000
	L	19.250		L	18.480		L	20.800		L	19.800		L	19.800		L	24.000
45°						45°											
275	W	19.800	330	W	20.790	400	W	25.200	275	W	24.750	330	W	19.800	400	W	24.000
	L	17.875		L	17.160		L	20.800		L	19.800		L	19.800		L	24.000

Figura 58. Determinación de potencia pico instalada de todas las configuraciones para el rectángulo I.

Las potencias pico instaladas para todas las configuraciones se resume en la Tabla 8.

Potencia pico instalada (kW _p)		
	Ángulo medianera α (-30°)	Ángulo complementario B (60°)
275W -25	24,750	24,750
275W-30	22,275	24,750
275W-35	22,275	24,750
275W-40	19,800	24,750
275W-45	19,800	24,750
275L-25	22,000	24,750
275L-30	20,625	24,750
275L-35	19,250	19,800
275L-40	19,250	19,800
275L-45	17,875	19,800
330W-25	23,760	29,700
330W-30	23,760	19,800
330W-35	20,790	19,800
330W-40	20,790	19,800
330W-45	20,790	19,800
330L-25	21,120	24,750
330L-30	19,800	24,750
330L-35	18,480	19,800
330L-40	18,480	19,800
330L-45	17,160	19,800
400W-25	28,800	24,000
400W-30	25,200	24,000
400W-35	25,200	24,000
400W-40	25,200	24,000
400W-45	25,200	24,000
400L-25	25,600	30,000
400L-30	24,000	30,000
400L-35	22,400	24,000
400L-40	20,800	24,000
400L-45	20,800	24,000

Tabla 8. Potencias pico instaladas de cada arreglo para el rectángulo I.

Al comparar las potencias pico instaladas para cada ángulo de inclinación θ (25°, 30°, 35°, 40° y 45°) y ángulo del azimut (-30° y 60°), se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 9.

Potencia pico instalada (kW _p)				
Ángulo inclinación θ	Ángulo medianera α (-30°)		Ángulo complementario β (60°)	
25°	400W-25	28,800	400L-25	30,000
30°	400W-30	25,200	400L-30	30,000
35°	400W-35	25,200	275W-35	24,750
40°	400W-40	25,200	275W-40	24,750
45°	400W-45	25,200	275W-45	24,750

Tabla 9. Potencias pico instaladas de los mejores arreglos para cada ángulo de inclinación y ángulo de azimut

Para comparar las potencias pico instaladas seleccionadas y con cierto ángulo de inclinación θ (25, 30°, 35°, 40° y 45°) se utilizan las Ecuaciones (9) – (13) para obtener las potencias equivalentes de los arreglos con ángulo de azimut $\beta = 60^\circ$ en términos del ángulo de medianera $\alpha = -30^\circ$. Los resultados se muestran en la Tabla 10.

Potencia pico instalada (kW _p)				
Ángulo inclinación θ	Ángulo medianera α (-30°)		Ángulo complementario β (60°) en términos de α	
25°	400W-25	28,800	400L-25	28,580
30°	400W-30	25,200	400L-30	28,440
35°	400W-35	25,200	275W-35	23,320
40°	400W-40	25,200	275W-40	23,220
45°	400W-45	25,200	275W-45	23,170

Tabla 10. Potencias equivalentes de ángulo complementario $\beta = 60^\circ$ a ángulo medianera $\alpha = -30^\circ$.

En la Tabla 10 se marcaron en negrita los arreglos con la mayor potencia pico instalada para cada ángulo de inclinación, en este caso casi todos los arreglos con un ángulo de azimut de -30° generan la mayor cantidad de energía.

Por último, las potencias pico seleccionadas se transforman en potencias equivalentes con un ángulo de azimut $\alpha = -30^\circ$ y un ángulo de inclinación $\theta = 25^\circ$ para poder hacer la comparación mediante las Ecuaciones (14) - (17) al sustituir el término $P_{k@ \alpha}$ por el valor seleccionado de la Tabla 10, $P_{sel@ \alpha}$, dando como resultado las siguientes ecuaciones:

$$P'_{eq@ \alpha, 25^\circ} = \frac{P_{sel@ \alpha, 30^\circ}}{-1,333E-09\alpha^4 + 1,076E-08\alpha^3 + 5,647E-06\alpha^2 - 2,479E-05\alpha + 0,988} \quad (24)$$

$$P'_{eq@ \alpha, 25^\circ} = \frac{P_{sel@ \alpha, 35^\circ}}{-1,776E-09\alpha^4 + 1,259E-08\alpha^3 + 8,685E-06\alpha^2 - 3,751E-05\alpha + 0,983} \quad (25)$$

$$P'_{eq@ \alpha, 25^\circ} = \frac{P_{sel@ \alpha, 40^\circ}}{-2,424E-10\alpha^4 - 3,289E-08\alpha^3 + 9,148E-06\alpha^2 - 1,496E-05\alpha + 0,984} \quad (26)$$

$$P'_{eq@ \alpha, 25^\circ} = \frac{P_{sel@ \alpha, 45^\circ}}{-1,623E-10\alpha^4 - 4,650E-08\alpha^3 + 1,179E-05\alpha^2 - 1,818E-05\alpha + 0,991} \quad (27)$$

Donde:

$P_{sel@α,30° (35°, 40°, 45°)}$ = Potencia seleccionada entre la comparación de $α$ y $β$ en la Tabla 10 en términos de potencia equivalente con ángulo de azimut $α$ y un ángulo de inclinación $θ = 30°, 35°, 40°, 45°$ (kW).

$P'_{eq@α,25°}$ = Potencia equivalente con un ángulo de azimut $α$ y un ángulo de inclinación $θ$ de $25°$ (kW).

Los resultados de estas conversiones se muestran en la Tabla 11:

Potencia pico instalada (kW _p)			
Ángulo inclinación $θ$	Arreglo seleccionado en Tabla 10		Potencia equivalente a $θ=25°$
25°	400W-25	28,800	28,800
30°	400L-30	28,440	28,650
35°	400W-35	25,200	25,450
40°	400W-40	25,200	25,370
45°	400W-45	25,200	25,120

Tabla 11. Potencias equivalentes de ángulo de inclinación $θ = 25°$.

De la Tabla 11, se puede observar que el arreglo 400W-25 con ángulo de azimut $α = -30°$ es el que tiene la mayor potencia pico equivalente instalada para el rectángulo I. La Figura 59 muestra una parte del proceso de comparación.

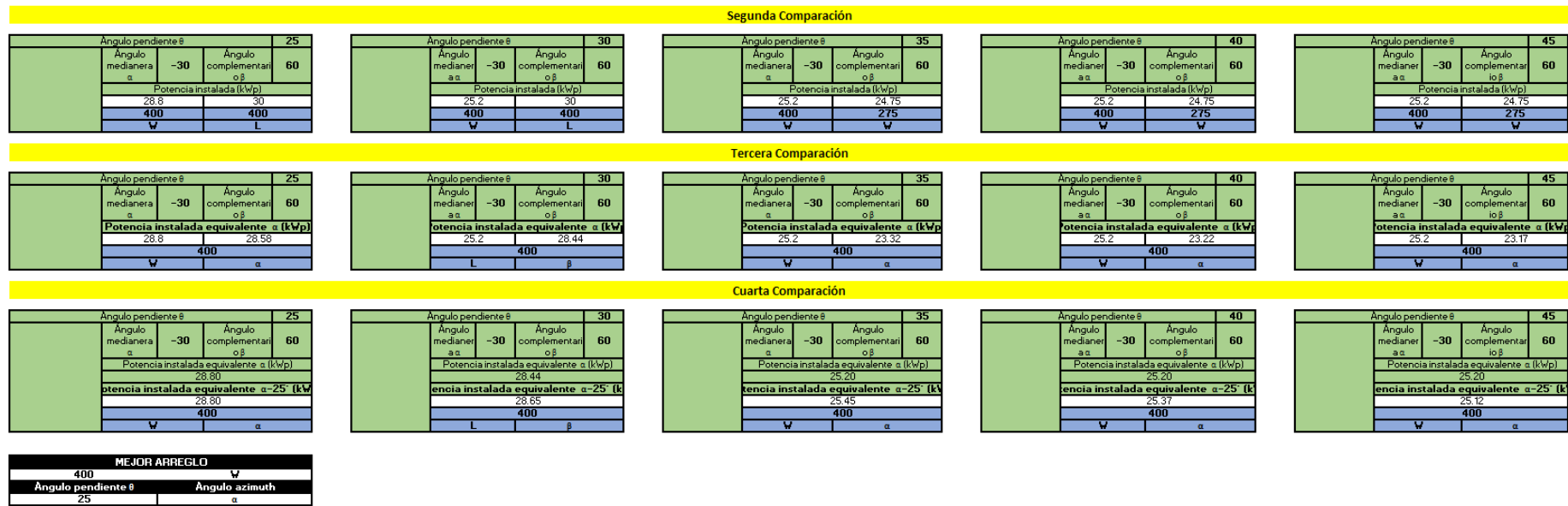


Figura 59. Determinación del arreglo óptimo con base en las relaciones de conversión.

Para comparar el resultado obtenido, se utiliza la herramienta proporcionada por PVGIS para determinar la energía generada en un punto específico (24), los resultados se muestran en la siguiente figura.

	Ángulo medianera α (-30°)		Ángulo complementario β (60°)	
	Potencia pico instalada (kW _p)	Energía generada (kWh/año)	Potencia pico instalada (kW _p)	Energía generada (kWh/año)
275W -25	24,750	38.389,38	24,750	36.315,19
275W-30	22,275	34.809,12	24,750	36.367,78
275W-35	22,275	34.912,11	24,750	36.185,23
275W-40	19,800	30.930,16	24,750	35.867,93
275W-45	19,800	30.625,35	24,750	35.405,77
275L-25	22,000	34.123,90	24,750	36.315,19
275L-30	20,625	32.230,66	24,750	36.367,78
275L-35	19,250	30.170,96	19,800	28.948,18
275L-40	19,250	30.070,99	19,800	28.694,35
275L-45	17,875	27.647,88	19,800	28.324,61
330W-25	23,760	36.853,81	29,700	43.578,22
330W-30	23,760	37.129,72	19,800	29.094,23
330W-35	20,790	32.584,63	19,800	28.948,18
330W-40	20,790	32.476,67	19,800	28.694,35
330W-45	20,790	32.156,62	19,800	28.324,61
330L-25	21,120	32.758,94	24,750	36.315,19
330L-30	19,800	30.941,44	24,750	36.367,78
330L-35	18,480	28.964,12	19,800	28.948,18
330L-40	18,480	28.868,15	19,800	28.694,35
330L-45	17,160	26.541,97	19,800	28.324,61
400W-25	28,800	44.671,28	24,000	35.214,73
400W-30	25,200	39.380,01	24,000	35.265,73
400W-35	25,200	39.496,52	24,000	35.088,71
400W-40	25,200	39.365,66	24,000	34.781,03
400W-45	25,200	38.977,72	24,000	34.332,87
400L-25	25,600	39.707,81	30,000	44.018,41
400L-30	24,000	37.504,77	30,000	44.082,16
400L-35	22,400	35.108,02	24,000	35.088,71
400L-40	20,800	32.492,29	24,000	34.781,03
400L-45	20,800	32.172,08	24,000	34.332,87

Tabla 12. Energía generada para cada arreglo en el rectángulo I con ayuda de PVGIS (24).

La Tabla 12 muestra que el arreglo que genera la mayor cantidad de energía es el 400W-25 con ángulo de azimut -30°, tal como se había determinado con la metodología.

El rectángulo I tiene un área de 297,35 m², por lo tanto, se puede obtener la relación de potencia instalada y área. Si tenemos una potencia pico instalada de 28,800 kW_p, esta relación tiene un valor de 10,32 m² / kW_p. Asimismo, se instalarían 72 paneles solares con una potencia de 400 W.

El arreglo seleccionado tiene un ángulo de azimut igual a -30° y ángulo de inclinación de 25°, por lo cual se debe utilizar la Ecuación (18) que, al sustituir los valores correspondientes, se obtiene un factor de emisiones de 1,359. Asimismo, se emplea la Ecuación (23) al sustituir el factor de emisiones y la energía eléctrica generada anual (44.671,28 kWh) y se obtiene un ahorro de emisiones igual a 116.869 kg de CO₂ equivalente. La Figura 60 muestra el balance de kg de CO₂ equivalente para la instalación fotovoltaica seleccionada. Es importante recalcar, el enorme beneficio ambiental de esta instalación ya que se reduce la emisión de contaminantes en casi un 66%.

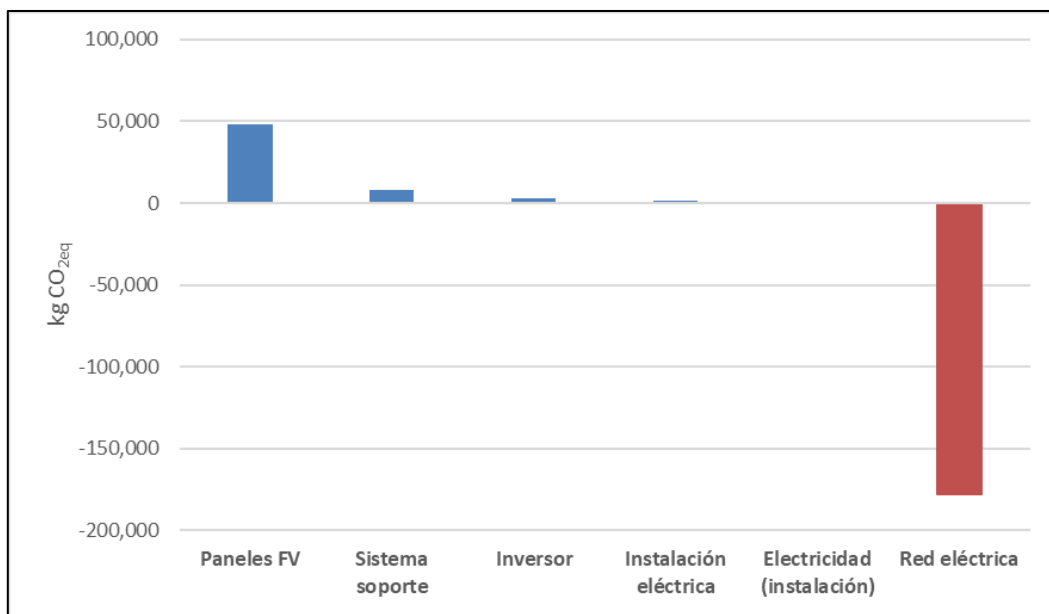


Figura 60. Balance de kg de CO₂ equivalente para la instalación fotovoltaica seleccionada.

CAPÍTULO 3. PROPORCIÓN m^2/kW_p EN CUBIERTAS

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se desarrollará la metodología para determinar la proporción m^2/kW_p basándose en el número de paneles fotovoltaicos que se pueden instalar en un área rectangular dependiendo de la potencia nominal del panel (y, por ende, sus dimensiones geométricas), ángulo de inclinación, colocación (vertical u horizontal) y las dimensiones propias del área a analizar.

Posteriormente, se calcula las proporciones m^2/kW_p instalado para todas las combinaciones posibles al variar la longitud y anchura del área de 0 a 25 metros en incrementos de 0,5 metros para potencias de 330 W y 400 W y varios ángulos de inclinación.

A continuación, se grafican dichas proporciones contra varios parámetros con el propósito de encontrar relaciones que ayuden a estimar la proporción m^2/kW_p . Asimismo, se determina el porcentaje de todas las posibles configuraciones de potencia y ángulo de inclinación que superen ciertos valores fijos de m^2/kW_p para ayudar a visualizar mejor la variación de la proporción.

3.2. METODOLOGÍA

Una vez determinado el número de paneles que se pueden acomodar a lo largo de la longitud y anchura de un área rectangular para diferentes potencias, colocación y ángulos de inclinación (descrito en el capítulo anterior), se calcula el número de paneles que se pueden colocar en un área al variar su longitud y anchura desde un valor de 0 hasta 25 metros en incrementos de 0,5 metros. El límite de 25 metros se estableció ya que la mayoría de las cubiertas en la ciudad de Valencia no superan este valor, pero puede fácilmente ampliarse dicho límite para áreas más grandes. En esta metodología, se considera la anchura como la dimensión paralela a la dirección Norte-Sur, mientras que la longitud es paralela a la dirección Este-Oeste.

Para determinar la proporción m^2/kW_p para un área con dimensiones específicas, en primer lugar, se determina el número de paneles que se puedan colocar a lo largo de su longitud y anchura, enseguida, se multiplican entre sí dichas cantidades para calcular el número de paneles total y se multiplica nuevamente dicho número por la potencia nominal del panel fotovoltaico bajo análisis. Esta cantidad es la potencia total instalada en kW_p . Finalmente, se divide el producto de la longitud y la anchura del rectángulo por la potencia total instalada para obtener la proporción m^2/kW_p requerida. Toda esta descripción se puede representar matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$\frac{m^2}{kW_p} = \frac{AB}{n_A n_B P_{nom}} \quad (28)$$

Donde:

A = Longitud del área a analizar (m).

B = Anchura del área a analizar (m).

n_A = Número de paneles fotovoltaicos instalados a lo largo de la dimensión A.

n_B = Número de paneles fotovoltaicos instalados a lo largo de la dimensión B.

P_{nom} = Potencia nominal del panel fotovoltaico (kW_p).

La Tabla 13 muestra la proporción m²/kW_p para un panel fotovoltaico de 400 W colocado sobre su ancho con un ángulo de inclinación de 30° para varios valores de anchura y longitud de área. Se puede observar que a medida que se incrementa la longitud del área y manteniendo la anchura constante (y viceversa) se tiene un patrón de incremento y una brusca reducción para nuevamente sufrir un incremento.

Esto es ocasionado por la restricción espacial del panel fotovoltaico ya que solo se pueden instalar paneles completos y si la longitud (o anchura) no es lo suficientemente grande, la potencia total instalada permanecerá constante a medida que se incrementa dicha longitud (o anchura), lo cual aumenta la proporción m²/kW_p hasta un punto en el cual ya es posible colocar otro panel fotovoltaico y reducir, por ende, la proporción y así repetir el patrón.

Por ejemplo, para una anchura de 5 metros, se tiene una proporción de 18,75 m²/kW_p para una longitud de 3, pero al incrementar 0,5 m la longitud (3,5 m) ya se puede colocar otra columna de paneles fotovoltaicos y la proporción se reduce a un valor de 14,58 m²/kW_p. A continuación, si se incrementa dicha longitud otros 0,5 m no es posible incrementar el número de paneles instalados y la proporción aumenta a 16,67 m²/kW_p para reducirse a 14,08 cuando se añaden otros 0,5 m en la longitud, y así sucesivamente. Por otro lado, si se toma una longitud de 10 metros con una anchura de 4 metros, se obtiene un valor de 11,11 m²/kW_p, al incrementar la anchura en intervalos de 0,5 m se puede observar que la proporción m²/kW_p aumenta también hasta que la anchura alcanza un valor de 6 metros lo cual permite introducir otro panel más y reducir la proporción a 8,33 m²/kW_p. Es importante destacar, que estos cambios bruscos en los valores m²/kW_p son menos frecuentes al cambiar la anchura que la longitud ya que el espacio necesario para acomodar un panel es mayor en la primera debido a las sombras generadas entre filas de paneles.

Esta metodología se repite para las dos potencias, dos tipos de colocaciones y ángulos de inclinación desde 25° hasta 45° en incrementos de 5°. El ANEXO A muestra los valores m²/kW_p para dichas combinaciones.

Ancho/Largo	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	7.50	10.00	6.25	7.50	5.83	6.67	5.63	6.25	5.50	6.00	5.42	5.83	5.36	5.71	5.31	5.63	5.28	5.56	5.56
2.5	0.00	0.00	0.00	9.38	12.50	7.81	9.38	7.29	8.33	7.03	7.81	6.88	7.50	6.77	7.29	6.70	7.14	6.64	7.03	6.60	6.94	6.94
3	0.00	0.00	0.00	11.25	15.00	9.38	11.25	8.75	10.00	8.44	9.38	8.25	9.00	8.13	8.75	8.04	8.57	7.97	8.44	7.92	8.33	8.33
3.5	0.00	0.00	0.00	13.13	17.50	10.94	13.13	10.21	11.67	9.84	10.94	9.63	10.50	9.48	10.21	9.38	10.00	9.30	9.84	9.24	9.72	9.72
4	0.00	0.00	0.00	15.00	20.00	12.50	15.00	11.67	13.33	11.25	12.50	11.00	12.00	10.83	11.67	10.71	11.43	10.63	11.25	10.56	11.11	11.11
4.5	0.00	0.00	0.00	16.88	22.50	14.06	16.88	13.13	15.00	12.66	14.06	12.38	13.50	12.19	13.13	12.05	12.86	11.95	12.66	11.88	12.50	12.50
5	0.00	0.00	0.00	18.75	25.00	15.63	18.75	14.58	16.67	14.06	15.63	13.75	15.00	13.54	14.58	13.39	14.29	13.28	14.06	13.19	13.89	13.89
5.5	0.00	0.00	0.00	20.63	27.50	17.19	20.63	16.04	18.33	15.47	17.19	15.13	16.50	14.90	16.04	14.73	15.71	14.61	15.47	14.51	15.28	15.28
6	0.00	0.00	0.00	11.25	15.00	9.38	11.25	8.75	10.00	8.44	9.38	8.25	9.00	8.13	8.75	8.04	8.57	7.97	8.44	7.92	8.33	8.33
6.5	0.00	0.00	0.00	12.19	16.25	10.16	12.19	9.48	10.83	9.14	10.16	8.94	9.75	8.80	9.48	8.71	9.29	8.63	9.14	8.58	9.03	9.03
7	0.00	0.00	0.00	13.13	17.50	10.94	13.13	10.21	11.67	9.84	10.94	9.63	10.50	9.48	10.21	9.38	10.00	9.30	9.84	9.24	9.72	9.72
7.5	0.00	0.00	0.00	14.06	18.75	11.72	14.06	10.94	12.50	10.55	11.72	10.31	11.25	10.16	10.94	10.04	10.71	9.96	10.55	9.90	10.42	10.42
8	0.00	0.00	0.00	15.00	20.00	12.50	15.00	11.67	13.33	11.25	12.50	11.00	12.00	10.83	11.67	10.71	11.43	10.63	11.25	10.56	11.11	11.11
8.5	0.00	0.00	0.00	15.94	21.25	13.28	15.94	12.40	14.17	11.95	13.28	11.69	12.75	11.51	12.40	11.38	12.14	11.29	11.95	11.22	11.81	11.81
9	0.00	0.00	0.00	16.88	22.50	14.06	16.88	13.13	15.00	12.66	14.06	12.38	13.50	12.19	13.13	12.05	12.86	11.95	12.66	11.88	12.50	12.50
9.5	0.00	0.00	0.00	17.81	23.75	14.84	17.81	13.85	15.83	13.36	14.84	13.06	14.25	12.86	13.85	12.72	13.57	12.62	13.36	12.53	13.19	13.19
10	0.00	0.00	0.00	18.75	25.00	15.63	18.75	14.58	16.67	14.06	15.63	13.75	15.00	13.54	14.58	13.39	14.29	13.28	14.06	13.19	13.89	13.89

Tabla 13. Proporción m^2/kW_p para una configuración 400W - 30 para diferentes longitudes y anchura de área.

Al analizar los datos de todas las configuraciones posibles, se puede observar el mismo comportamiento previamente descrito lo cual confirma la explicación ya dada. Como muestra se toma la Tabla 14, en esta figura se muestra una fracción de los resultados de la configuración 330W - 45 colocado sobre su largo. Para una anchura de 20 metros y longitud de 18 metros se tiene un valor de $15,15 \text{ m}^2/\text{kW}_p$, este valor aumenta de magnitud al mismo tiempo que se incrementa la longitud hasta alcanzar los 20 metros cuando toma un valor de $15,15 \text{ m}^2/\text{kW}_p$ nuevamente. Por otra parte, se tiene un valor de $14,02 \text{ m}^2/\text{kW}_p$ para una longitud de 18 metros y una anchura de 18,5 m, la proporción m^2/kW_p crece de valor al incrementar la anchura hasta que se rebasa el valor de 20 metros, para una anchura de 20,5 metros se tiene un valor de $14,19 \text{ m}^2/\text{kW}_p$ tras alcanzar uno de $15,57 \text{ m}^2/\text{kW}_p$.

A continuación, se comparan directamente las tablas obtenidas de los dos tipos de colocaciones (horizontal y vertical) para cada potencia y cada ángulo de inclinación escogiendo siempre el menor a menos que el valor menor sea igual a 0, bajo esa condición, se toma el valor diferente de 0 ya que un valor nulo significa que no es posible instalar un solo panel fotovoltaico en esa área debido a las dimensiones geométricas del panel mismo y del ángulo de inclinación que tenga. El ángulo de inclinación de 25° tiene un límite inferior mayor que el del ángulo de 45° , por ejemplo, ya que su proyección horizontal es mayor debido a un mayor ángulo de inclinación. A continuación, se muestra la Tabla 15 es la resultante de la comparación de la configuración 400 W con un ángulo de inclinación de 30° como ejemplo.

15.69	16.22	14.65	15.10	15.56	16.02	14.65	15.05	15.46	15.87	14.65	15.01	15.38	15.74	14.65	14.98	15.31	15.65	14.65	14.95	15.26	14.5
16.23	16.77	15.15	15.63	16.10	16.57	15.15	15.57	15.99	16.41	15.15	15.53	15.91	16.29	15.15	15.50	15.84	16.18	15.15	15.47	15.78	15
14.38	14.86	13.42	13.84	14.26	14.68	13.42	13.79	14.17	14.54	13.42	13.76	14.09	14.43	13.42	13.72	14.03	14.33	13.42	13.70	13.98	15.5
14.84	15.34	13.85	14.29	14.72	15.15	13.85	14.24	14.62	15.01	13.85	14.20	14.55	14.89	13.85	14.17	14.48	14.80	13.85	14.14	14.43	16
15.31	15.82	14.29	14.73	15.18	15.63	14.29	14.68	15.08	15.48	14.29	14.64	15.00	15.36	14.29	14.61	14.94	15.26	14.29	14.58	14.88	16.5
15.77	16.30	14.72	15.18	15.64	16.10	14.72	15.13	15.54	15.95	14.72	15.09	15.45	15.82	14.72	15.05	15.39	15.72	14.72	15.03	15.33	17
16.23	16.77	15.15	15.63	16.10	16.57	15.15	15.57	15.99	16.41	15.15	15.53	15.91	16.29	15.15	15.50	15.84	16.18	15.15	15.47	15.78	17.5
14.61	15.10	13.64	14.06	14.49	14.91	13.64	14.02	14.39	14.77	13.64	13.98	14.32	14.66	13.64	13.95	14.26	14.57	13.64	13.92	14.20	18
15.02	15.52	14.02	14.45	14.89	15.33	14.02	14.40	14.79	15.18	14.02	14.37	14.72	15.07	14.02	14.33	14.65	14.97	14.02	14.31	14.60	18.5
15.42	15.94	14.39	14.84	15.29	15.74	14.39	14.79	15.19	15.59	14.39	14.75	15.11	15.47	14.39	14.72	15.05	15.38	14.39	14.69	14.99	19
15.83	16.36	14.77	15.23	15.70	16.16	14.77	15.18	15.59	16.00	14.77	15.14	15.51	15.88	14.77	15.11	15.44	15.78	14.77	15.08	15.39	19.5
16.23	16.77	15.15	15.63	16.10	16.57	15.15	15.57	15.99	16.41	15.15	15.53	15.91	16.29	15.15	15.50	15.84	16.18	15.15	15.47	15.78	20
14.79	15.28	13.80	14.24	14.67	15.10	13.80	14.19	14.57	14.96	13.80	14.15	14.49	14.84	13.80	14.12	14.43	14.75	13.80	14.09	14.38	20.5
15.15	15.66	14.14	14.58	15.03	15.47	14.14	14.53	14.93	15.32	14.14	14.49	14.85	15.20	14.14	14.46	14.78	15.11	14.14	14.44	14.73	21
15.51	16.03	14.48	14.93	15.38	15.84	14.48	14.88	15.28	15.68	14.48	14.84	15.20	15.56	14.48	14.81	15.14	15.47	14.48	14.78	15.08	21.5
15.87	16.40	14.81	15.28	15.74	16.20	14.81	15.23	15.64	16.05	14.81	15.19	15.56	15.93	14.81	15.15	15.49	15.82	14.81	15.12	15.43	22
16.23	16.77	15.15	15.63	16.10	16.57	15.15	15.57	15.99	16.41	15.15	15.53	15.91	16.29	15.15	15.50	15.84	16.18	15.15	15.47	15.78	22.5
14.94	15.43	13.94	14.38	14.81	15.25	13.94	14.33	14.71	15.10	13.94	14.29	14.64	14.98	13.94	14.26	14.57	14.89	13.94	14.23	14.52	23
15.26	15.77	14.24	14.69	15.13	15.58	14.24	14.64	15.03	15.43	14.24	14.60	14.95	15.31	14.24	14.57	14.89	15.21	14.24	14.54	14.84	23.5
15.58	16.10	14.55	15.00	15.45	15.91	14.55	14.95	15.35	15.76	14.55	14.91	15.27	15.64	14.55	14.88	15.21	15.54	14.55	14.85	15.15	24
15.91	16.44	14.85	15.31	15.78	16.24	14.85	15.26	15.67	16.09	14.85	15.22	15.59	15.96	14.85	15.19	15.52	15.86	14.85	15.16	15.47	24.5
16.23	16.77	15.15	15.63	16.10	16.57	15.15	15.57	15.99	16.41	15.15	15.53	15.91	16.29	15.15	15.50	15.84	16.18	15.15	15.47	15.78	25
15	15.5	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5	20	20.5	21	21.5	22	22.5	23	23.5	24	24.5	25	

Tabla 14. Proporción m^2/kW_p para una configuración 330W - 45 para diferentes longitudes y anchura de área.

Diseño de una Herramienta Automática de Optimización de Instalación de Paneles Fotovoltaicos en Cubiertas de Edificios

Ancho/Largo	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.25	7.50	8.75	10.00	5.63	6.25	6.88	7.50	5.42	5.83	6.25	6.67	5.31	5.63	5.94	6.25	5.25	5.50	5.75	6.00	5.21
1.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.38	11.25	13.13	15.00	8.44	9.38	10.31	11.25	8.13	8.75	9.38	10.00	7.97	8.44	8.91	9.38	7.88	8.25	8.63	9.00	7.81
2	0.00	0.00	0.00	7.50	10.00	6.25	7.50	5.83	6.67	5.63	6.25	5.50	6.00	5.42	5.83	5.36	5.71	5.31	5.63	5.28	5.56	5.25	5.50	5.23	5.45	5.21
2.5	0.00	0.00	0.00	9.38	12.50	7.81	9.38	7.29	8.33	7.03	7.81	6.88	7.50	6.77	7.29	6.70	7.14	6.64	7.03	6.60	6.94	6.56	6.88	6.53	6.82	6.51
3	0.00	0.00	0.00	11.25	15.00	9.38	11.25	8.75	10.00	8.44	9.38	8.25	9.00	8.13	8.75	8.04	8.57	7.97	8.44	7.92	8.33	7.88	8.25	7.84	8.18	7.81
3.5	0.00	0.00	0.00	13.13	17.50	10.94	13.13	10.21	11.67	9.84	10.94	9.63	10.50	9.48	10.21	9.38	10.00	9.30	9.84	9.24	9.72	9.19	9.63	9.15	9.55	9.11
4	0.00	0.00	0.00	15.00	20.00	12.50	15.00	11.67	13.33	11.25	12.50	11.00	12.00	10.83	11.67	10.71	11.43	10.63	11.25	10.56	11.11	10.50	11.00	10.45	10.91	10.42
4.5	0.00	0.00	0.00	16.88	22.50	14.06	16.88	13.13	15.00	12.66	14.06	12.38	13.50	12.19	13.13	12.05	12.86	11.95	12.66	11.88	12.50	11.81	12.38	11.76	12.27	11.72
5	0.00	0.00	0.00	18.75	25.00	15.63	18.75	14.58	16.67	14.06	15.63	13.75	15.00	13.54	14.58	13.39	14.29	13.28	14.06	13.19	13.89	13.13	13.75	13.07	13.64	13.02
5.5	0.00	0.00	0.00	20.63	27.50	17.46	20.63	16.04	18.33	16.31	17.46	15.75	17.00	15.42	16.67	15.46	14.22	15.14	14.31	14.89	14.46	13.63	14.08	13.54	14.00	13.46
6	0.00	0.00	0.00	22.50	30.00	19.17	22.50	17.50	20.00	18.00	19.17	17.00	18.50	16.50	17.83	16.57	15.42	16.31	15.49	15.06	14.63	13.75	14.20	13.66	14.12	13.58
6.5	0.00	0.00	0.00	24.38	32.50	20.88	24.38	18.54	21.00	19.50	20.88	18.50	20.00	17.50	18.83	17.57	16.42	17.31	16.49	16.06	15.63	14.75	15.20	14.66	15.12	14.58
7	0.00	0.00	0.00	26.25	35.00	22.59	26.25	19.51	22.00	20.50	22.59	20.00	21.50	18.50	20.00	18.71	17.56	18.45	17.63	17.20	16.77	15.89	16.34	15.80	16.26	15.72
7.5	0.00	0.00	0.00	28.13	37.50	24.30	28.13	20.48	23.00	21.50	24.30	21.50	23.00	19.50	21.00	19.71	18.56	19.45	18.63	18.20	17.77	16.89	17.34	16.80	17.26	16.72
8	0.00	0.00	0.00	30.00	40.00	26.01	30.00	21.45	24.00	22.50	26.01	23.00	24.50	20.50	22.00	20.71	19.56	20.45	19.63	19.20	18.77	17.89	18.34	17.80	18.26	17.72
8.5	0.00	0.00	0.00	31.88	42.50	27.72	31.88	22.42	25.00	23.50	27.72	24.00	25.50	21.50	23.00	21.71	20.56	21.45	20.63	20.20	19.77	18.89	19.34	18.80	19.26	18.72
9	0.00	0.00	0.00	33.75	45.00	29.43	33.75	23.39	26.00	24.50	29.43	25.00	26.50	22.50	24.00	22.71	21.56	22.45	21.63	21.20	20.77	19.89	20.34	19.80	20.26	19.72
9.5	0.00	0.00	0.00	35.63	47.50	31.14	35.63	24.36	27.00	25.50	31.14	26.00	27.50	23.50	25.00	23.71	22.56	23.45	22.63	22.20	21.77	20.89	21.34	20.80	21.26	20.72
10	0.00	0.00	0.00	37.50	50.00	32.85	37.50	25.33	28.00	26.50	32.85	27.00	28.50	24.50	26.00	24.71	23.56	24.45	23.63	23.20	22.77	21.89	22.34	21.80	22.26	21.72
10.5	0.00	0.00	0.00	39.38	52.50	34.56	39.38	26.30	29.00	27.50	34.56	28.00	29.50	25.50	27.00	25.71	24.56	25.45	24.63	24.20	23.77	22.89	23.34	22.80	23.26	22.72
11	0.00	0.00	0.00	41.25	55.00	36.27	41.25	27.27	30.00	28.50	36.27	29.00	30.50	26.50	28.00	26.71	25.41	26.30	25.48	25.05	24.62	23.74	24.19	23.65	24.11	23.57
11.5	0.00	0.00	0.00	43.13	57.50	37.98	43.13	28.24	31.00	29.50	37.98	30.00	31.50	27.50	29.00	27.71	26.26	27.15	26.33	25.90	25.47	24.59	25.04	24.50	24.96	24.42
12	0.00	0.00	0.00	45.00	60.00	39.69	45.00	29.21	32.00	30.50	39.69	31.00	32.50	28.50	30.00	28.71	27.11	28.00	27.18	26.75	26.32	25.44	25.99	25.45	25.91	25.37
12.5	0.00	0.00	0.00	46.88	62.50	41.40	46.88	30.18	33.00	31.50	41.40	32.00	33.50	29.50	31.00	29.71	27.96	28.85	28.03	27.60	27.17	26.29	26.84	26.30	26.76	26.22
13	0.00	0.00	0.00	48.75	65.00	43.11	48.75	31.15	34.00	32.50	43.11	33.00	34.50	30.50	32.00	30.71	28.81	29.70	28.88	28.45	28.02	27.14	27.69	27.15	27.61	27.07
13.5	0.00	0.00	0.00	50.63	67.50	44.82	50.63	32.12	35.00	33.50	44.82	34.00	35.50	31.50	33.00	31.71	29.66	30.59	29.76	29.33	28.90	28.02	28.57	28.03	28.49	27.95
14	0.00	0.00	0.00	52.50	70.00	46.53	52.50	33.09	36.00	34.50	46.53	35.00	36.50	32.50	34.00	32.71	30.51	31.48	30.65	30.22	29.79	28.91	29.46	28.92	29.38	28.84
14.5	0.00	0.00	0.00	54.38	72.50	48.24	54.38	34.06	37.00	35.50	48.24	36.00	37.50	33.50	35.00	33.71	31.36	32.37	31.54	31.11	30.68	29.80	30.35	29.81	30.27	29.73
15	0.00	0.00	0.00	56.25	75.00	49.95	56.25	35.03	38.00	36.50	49.95	37.00	38.50	34.50	36.00	34.71	32.21	33.26	32.41	31.98	31.55	30.67	31.22	30.73	31.19	30.65
15.5	0.00	0.00	0.00	58.13	77.50	51.66	58.13	36.00	39.00	37.50	51.66	38.00	39.50	35.50	37.00	35.71	33.06	34.15	33.28	32.85	32.42	31.54	31.78	31.29	31.75	31.21
16	0.00	0.00	0.00	60.00	80.00	53.37	60.00	36.97	40.00	38.50	53.37	39.00	40.50	36.50	38.00	36.71	33.91	35.04	34.15	33.73	33.29	32.45	32.63	32.14	32.60	32.06
16.5	0.00	0.00	0.00	61.88	82.50	55.08	61.88	37.94	41.00	39.50	55.08	40.00	41.50	37.50	39.00	37.71	34.76	35.93	35.02	34.60	33.80	33.31	32.82	33.33	32.79	32.25
17	0.00	0.00	0.00	63.75	85.00	56.79	63.75	38.91	42.00	40.50	56.79	41.00	42.50	38.50	40.00	38.71	35.61	36.82	35.89	35.47	34.66	34.17	33.64	33.84	33.30	32.76
17.5	0.00	0.00	0.00	65.63	87.50	58.50	65.63	39.88	43.00	41.50	58.50	42.00	43.50	39.50	41.00	39.71	36.46	37.71	36.76	36.34	35.55	35.06	34.75	34.35	33.81	33.27
18	0.00	0.00	0.00	67.50	90.00	60.21	67.50	40.85	44.00	42.50	60.21	43.00	44.50	40.50	42.00	40.71	37.31	38.60	37.63	37.21	36.40	35.91	35.42	35.02	34.48	33.94
18.5	0.00	0.00	0.00	69.38	92.50	61.92	69.38	41.82	45.00	43.50	61.92	44.00	45.50	41.50	43.00	41.71	38.16	39.49	38.50	38.08	37.27	36.78	36.29	35.80	35.30	34.76
19	0.00	0.00	0.00	71.25	95.00	63.63	71.25	42.79	46.00	44.50	63.63	45.00	46.50	42.50	44.00	42.71	39.01	40.38	39.37	39.15	38.34	37.85	37.36	36.87	36.33	35.79
19.5	0.00	0.00	0.00	73.13	97.50	65.34	73.13	43.76	47.00	45.50	65.34	46.00	47.50	43.50	45.00	43.71	39.86	41.27	40.24	40.02	39.21	38.72	38.23	37.74	37.20	36.66
20	0.00	0.00	0.00	75.00	100.00	67.05	75.00	44.73	48.00	46.50	67.05	47.00	48.50	44.50	46.00	44.71	40.71	42.16	41.11	40.89	40.40	39.59	39.10	38.61	38.07	37.53
20.5	0.00	0.00	0.00	76.88	102.50	68.76	76.88	45.70	49.00	47.50	68.76	48.00	49.50	45.50	47.00	45.71	41.56	43.05	42.00	41.78	41.39	40.58	40.09	39.60	39.06	38.52
21	0.00	0.00	0.00	78.75	105.00	70.47	78.75	46.67	50.00	48.50	70.47	49.00	50.50	46.50	48.00	46.71	42.41	43.94	42.85	42.66	42.27	41.46	40.97	40.48	39.94	39.40
21.5	0.00	0.00	0.00	80.63	107.50	72.18	80.63	47.64	51.00	49.50	72.18	50.00	51.50	47.50	49.00	47.71	43.26	44.83	43.70	43.57	43.18	42.37	41.88	41.39	40.85	40.31
22	0.00	0.00	0.00	82.50	110.00	73.89	82.50	48.61	52.00	50.50	73.89	51.00	52.50	48.50	50.00	48.71	44.11	45.72	44.55	44.48	44.09	43.28	42.79	42.30	41.76	41.22
22.5	0.00	0.00	0.00	84.38	112.50	75.60	84.38	49.58																		

Diseño de una Herramienta Automática de Optimización de Instalación de Paneles Fotovoltaicos en Cubiertas de Edificios

13	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5	20	20.5	21	21.5	22	22.5	23	23.5	24	24.5	25	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.5
5.42	5.63	5.83	5.18	5.36	5.54	5.71	5.16	5.31	5.47	5.63	5.14	5.28	5.42	5.56	5.13	5.25	5.38	5.50	5.11	5.23	5.34	5.45	5.10	5.21	1
8.13	8.44	8.75	7.77	8.04	8.30	8.57	7.73	7.97	8.20	8.44	7.71	7.92	8.13	8.33	7.69	7.88	8.06	8.25	7.67	7.84	8.01	8.18	7.66	7.81	1.5
5.42	5.19	5.38	5.18	5.36	5.17	5.33	5.16	5.31	5.15	5.29	5.14	5.28	5.13	5.26	5.13	5.25	5.12	5.24	5.11	5.23	5.11	5.22	5.33	5.21	2
6.77	6.49	6.73	6.47	6.70	6.46	6.67	6.45	6.64	6.43	6.62	6.42	6.60	6.41	6.58	6.41	6.56	6.40	6.55	6.39	6.53	6.39	6.52	6.66	6.51	2.5
8.13	7.79	8.08	7.77	8.04	7.75	8.00	7.73	7.97	7.72	7.94	7.71	7.92	7.70	7.89	7.69	7.88	7.68	7.86	7.67	7.84	7.66	7.83	7.66	7.81	3
9.48	9.09	9.42	9.06	9.38	9.04	9.33	9.02	9.30	9.01	9.26	8.99	9.24	8.98	9.21	8.97	9.19	8.96	9.17	8.95	9.15	8.94	9.13	8.93	9.11	3.5
10.83	10.38	10.77	10.36	10.71	10.33	10.67	10.31	10.63	10.29	10.59	10.28	10.56	10.26	10.53	10.25	10.50	10.24	10.48	10.23	10.45	10.22	10.43	10.21	10.42	4
12.19	11.68	12.12	11.65	12.05	11.63	12.00	11.60	11.95	11.58	11.91	11.56	11.88	11.55	11.84	11.53	11.81	11.52	11.79	11.51	11.76	11.49	11.74	11.48	11.72	4.5
13.54	12.98	13.46	12.95	13.39	12.92	13.33	12.89	13.28	12.87	13.24	12.85	13.19	12.83	13.16	12.81	13.13	12.80	13.10	12.78	13.07	12.77	13.04	12.76	13.02	5
9.93	10.31	10.69	9.49	9.82	10.15	10.48	9.45	9.74	10.03	10.31	9.42	9.68	9.93	10.19	9.40	9.63	9.85	10.08	9.38	9.58	9.79	10.00	9.36	9.55	5.5
8.13	7.79	8.08	7.77	8.04	7.75	8.00	7.73	7.97	7.72	7.94	7.71	7.92	7.70	7.89	7.69	7.88	7.68	7.86	7.67	7.84	7.66	7.83	7.66	7.81	6
8.80	8.44	8.75	8.42	8.71	8.40	8.67	8.38	8.63	8.36	8.60	8.35	8.58	8.34	8.55	8.33	8.53	8.32	8.51	8.31	8.49	8.30	8.48	8.65	8.46	6.5
9.48	9.09	9.42	9.06	9.38	9.04	9.33	9.02	9.30	9.01	9.26	8.99	9.24	8.98	9.21	8.97	9.19	8.96	9.17	8.95	9.15	8.94	9.13	8.93	9.11	7
10.16	9.74	10.10	9.71	10.04	9.69	10.00	9.67	9.96	9.65	9.93	9.64	9.90	9.62	9.87	9.61	9.84	9.60	9.82	9.59	9.80	9.58	9.78	9.57	9.77	7.5
10.83	10.38	10.77	10.36	10.71	10.33	10.67	10.31	10.63	10.29	10.59	10.28	10.56	10.26	10.53	10.25	10.50	10.24	10.48	10.23	10.45	10.22	10.43	10.21	10.42	8
11.51	11.03	11.44	11.00	11.38	10.98	11.33	10.96	11.29	10.94	11.25	10.92	11.22	10.90	11.18	10.89	11.16	10.88	11.13	10.87	11.11	10.86	11.09	10.85	11.07	8.5
12.19	11.68	12.12	11.65	12.05	11.63	12.00	11.60	11.95	11.58	11.91	11.56	11.88	11.55	11.84	11.53	11.81	11.52	11.79	11.51	11.76	11.49	11.74	11.48	11.72	9
10.29	10.69	11.08	9.84	10.18	10.52	10.86	9.80	10.09	10.39	10.69	9.76	10.03	10.29	10.56	9.74	9.98	10.21	10.45	9.72	9.93	10.15	10.36	9.70	9.90	9.5
10.83	11.25	11.67	10.36	10.71	11.07	11.43	10.31	10.63	10.94	11.25	10.28	10.56	10.83	11.11	10.25	10.50	10.75	11.00	10.23	10.45	10.68	10.91	10.21	10.42	10
9.48	9.09	9.42	9.06	9.38	9.04	9.33	9.02	9.30	9.01	9.26	8.99	9.24	8.98	9.21	8.97	9.19	8.96	9.17	8.95	9.15	8.94	9.13	8.93	9.11	10.5
9.93	9.52	9.87	9.49	9.82	9.47	9.78	9.45	9.74	9.44	9.71	9.42	9.68	9.41	9.65	9.40	9.63	9.38	9.60	9.38	9.58	9.37	9.57	9.76	9.55	11
10.38	9.95	10.32	9.93	10.27	9.90	10.22	9.88	10.18	9.87	10.15	9.85	10.12	9.84	10.09	9.82	10.06	9.81	10.04	9.80	10.02	9.79	10.00	9.78	9.98	11.5
10.83	10.38	10.77	10.36	10.71	10.33	10.67	10.31	10.63	10.29	10.59	10.28	10.56	10.26	10.53	10.25	10.50	10.24	10.48	10.23	10.45	10.22	10.43	10.21	10.42	12
11.28	10.82	11.22	10.79	11.16	10.76	11.11	10.74	11.07	10.72	11.03	10.71	11.00	10.69	10.96	10.68	10.94	10.66	10.91	10.65	10.89	10.64	10.87	10.63	10.85	12.5
11.74	11.25	11.67	11.22	11.61	11.19	11.56	11.17	11.51	11.15	11.47	11.13	11.44	11.12	11.40	11.10	11.38	11.09	11.35	11.08	11.33	11.07	11.30	11.06	11.28	13
12.19	11.68	12.12	11.65	12.05	11.63	12.00	11.60	11.95	11.58	11.91	11.56	11.88	11.55	11.84	11.53	11.81	11.52	11.79	11.51	11.76	11.49	11.74	11.48	11.72	13.5
10.83	11.25	11.67	10.36	10.71	11.07	11.43	10.31	10.63	10.94	11.25	10.28	10.56	10.83	11.11	10.25	10.50	10.75	11.00	10.23	10.45	10.68	10.91	10.21	10.42	14
9.82	9.41	9.76	9.39	9.71	9.36	9.67	9.35	9.63	9.33	9.60	9.31	9.57	9.30	9.54	9.29	9.52	9.28	9.49	9.27	9.47	9.26	9.46	9.65	9.44	14.5
10.16	9.74	10.10	9.71	10.04	9.69	10.00	9.67	9.96	9.65	9.93	9.64	9.90	9.62	9.87	9.61	9.84	9.60	9.82	9.59	9.80	9.58	9.78	9.57	9.77	15
10.49	10.06	10.43	10.03	10.38	10.01	10.33	9.99	10.29	9.97	10.26	9.96	10.23	9.94	10.20	9.93	10.17	9.92	10.15	9.91	10.13	9.90	10.11	10.32	10.09	15.5
10.83	10.38	10.77	10.36	10.71	10.33	10.67	10.31	10.63	10.29	10.59	10.28	10.56	10.26	10.53	10.25	10.50	10.24	10.48	10.23	10.45	10.22	10.43	10.21	10.42	16
11.17	10.71	11.11	10.68	11.05	10.66	11.00	10.63	10.96	10.62	10.92	10.60	10.89	10.58	10.86	10.57	10.83	10.56	10.80	10.55	10.78	10.54	10.76	10.53	10.74	16.5
11.51	11.03	11.44	11.00	11.38	10.98	11.33	10.96	11.29	10.94	11.25	10.92	11.22	10.90	11.18	10.89	11.16	10.88	11.13	10.87	11.11	10.86	11.09	10.85	11.07	17
11.85	11.36	11.78	11.33	11.72	11.30	11.67	11.28	11.62	11.26	11.58	11.24	11.55	11.23	11.51	11.21	11.48	11.20	11.46	11.19	11.43	11.18	11.41	11.17	11.39	17.5
10.83	11.25	11.67	10.36	10.71	11.07	11.43	10.31	10.63	10.94	11.25	10.28	10.56	10.83	11.11	10.25	10.50	10.75	11.00	10.23	10.45	10.68	10.91	10.21	10.42	18
11.13	11.56	11.99	10.64	11.01	11.38	11.75	10.60	10.92	11.24	11.56	10.56	10.85	11.13	11.42	10.53	10.79	11.05	11.31	10.51	10.74	10.98	11.21	10.49	10.71	18.5
10.29	9.87	10.23	9.84	10.18	9.82	10.13	9.80	10.09	9.78	10.06	9.76	10.03	9.75	10.00	9.74	9.98	9.73	9.95	9.72	9.93	9.71	9.91	10.12	9.90	19
10.56	10.13	10.50	10.10	10.45	10.08	10.40	10.05	10.36	10.04	10.32	10.02	10.29	10.01	10.26	9.99	10.24	9.98	10.21	9.97	10.19	9.96	10.17	10.39	10.16	19.5
10.83	10.38	10.77	10.36	10.71	10.33	10.67	10.31	10.63	10.29	10.59	10.28	10.56	10.26	10.53	10.25	10.50	10.24	10.48	10.23	10.45	10.22	10.43	10.21	10.42	20
11.10	10.64	11.04	10.62	10.98	10.59	10.93	10.57	10.89	10.55	10.85	10.53	10.82	10.52	10.79	10.51	10.76	10.49	10.74	10.48	10.72	10.47	10.70	10.46	10.68	20.5
11.38	10.90	11.31	10.88	11.25	10.85	11.20	10.83	11.16	10.81	11.12	10.79	11.08	10.78	11.05	10.76	11.03	10.75	11.00	10.74	10.98	10.73	10.96	10.72	10.94	21
11.65	11.16	11.58	11.13	11.52	11.11	11.47	11.09	11.42	11.07	11.38	11.05	11.35	11.03	11.32	11.02	11.29	11.01	11.26	10.99	11.24	10.98	11.22	10.97	11.20	21.5
10.83	11.25	11.67	10.36	10.71	11.07	11.43	10.31	10.63	10.94	11.25	10.28	10.56	10.83	11.11	10.25	10.50	10.75	11.00	10.23	10.45	10.68	10.91	10.21	10.42	22
11.08	11.51	11.93	10.59	10.96	11.32	11.69	10.55	10.87	11.19	11.51	10.51	10.80	11.08	11.36	10.48	10.74	10.99	11.25	10.46	10.69	10.92	11.16	10.44	10.65	22.5
10.38	9.95	10.32	9.93	10.27	9.90	10.22	9.88	10.18	9.87	10.15	9.85	10.12	9.84	10.09	9.82	10.06	9.81	10.04	9.80	10.02	9.79	10.00	10.21	9.98	23
10.61	10.17	10.54	10.14	10.49	10.12	10.44	10.10	10.40	10.08	10.37	10.06	10.34	10.05	10.31	10.04	10.28	10.02	10.26							

Diseño de una Herramienta Automática de Optimización de Instalación de Paneles
Fotovoltaicos en Cubiertas de Edificios

La Tabla 16 muestra un fragmento de la tabla donde se conjunta todas las proporciones para cada potencia y cada ángulo de inclinación junto con los valores de anchura, longitud, área de superficie y la proporción anchura/longitud.

Anchura (m)	Longitud (m)	Superficie Total (m ²)	Anchura/Longitud	330-25	330-30	330-35	330-40	330-45	400-25	400-30	400-35	400-40	400-45
0.5	3	1.50	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5	4	2.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	6	6.00	0.17	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50
1	7.5	7.50	0.13	7.58	7.58	7.58	7.58	7.58	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25
1	8	8.00	0.13	6.06	6.06	6.06	6.06	6.06	6.67	6.67	6.67	6.67	6.67
1.5	7	10.50	0.21	10.61	10.61	10.61	5.30	5.30	8.75	8.75	8.75	8.75	4.38
1.5	9	13.50	0.17	10.23	10.23	10.23	5.11	5.11	8.44	8.44	8.44	8.44	4.22
1.5	11.5	17.25	0.13	10.45	10.45	10.45	4.75	4.75	8.63	8.63	8.63	8.63	3.92
1.5	12	18.00	0.13	9.09	9.09	9.09	4.96	4.96	9.00	9.00	9.00	9.00	4.09
2	9.5	19.00	0.21	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	5.28	5.28	5.28	5.28	5.28
2	11.5	23.00	0.17	6.34	6.34	6.34	6.34	6.34	5.23	5.23	5.23	5.23	5.23
2	12	24.00	0.17	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	5.45	5.45	5.45	5.45	5.45
2	15	30.00	0.13	6.49	6.49	6.49	6.49	6.49	5.36	5.36	5.36	5.36	5.36
2	15.5	31.00	0.13	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26	5.17	5.17	5.17	5.17	5.17
2	16	32.00	0.13	6.46	6.46	6.46	6.46	6.46	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33
2.5	12	30.00	0.21	8.26	8.26	8.26	8.26	8.26	6.82	6.82	6.82	6.82	6.82
2.5	14.5	36.25	0.17	7.85	7.85	7.85	7.85	7.85	6.47	6.47	6.47	6.47	6.47
2.5	15	37.50	0.17	8.12	8.12	8.12	8.12	8.12	6.70	6.70	6.70	6.70	6.70
2.5	19	47.50	0.13	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60
2.5	19.5	48.75	0.13	7.78	7.78	7.78	7.78	7.78	6.41	6.41	6.41	6.41	6.41
2.5	20	50.00	0.13	7.97	7.97	7.97	7.97	7.97	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58
3	14	42.00	0.21	9.09	9.09	9.79	9.79	9.79	8.08	8.08	8.08	8.08	8.08
3	14.5	43.50	0.21	9.42	9.42	9.42	9.42	9.42	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77
3	17.5	52.50	0.17	9.36	9.36	9.36	9.36	9.36	7.72	7.72	7.72	7.72	7.72
3	18	54.00	0.17	9.09	9.09	9.63	9.63	9.63	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94
3	22.5	67.50	0.13	9.30	9.30	9.30	9.30	9.30	7.67	7.67	7.67	7.67	7.67
3	23	69.00	0.13	9.50	9.50	9.50	9.50	9.50	7.84	7.84	7.84	7.84	7.84
3	23.5	70.50	0.13	9.29	9.29	9.29	9.29	9.29	7.66	7.66	7.66	7.66	7.66
3	24	72.00	0.13	9.09	9.09	9.49	9.49	9.49	7.83	7.83	7.83	7.83	7.83
3.5	16.5	57.75	0.21	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	9.02	9.02	9.02	9.02	9.02
3.5	17	59.50	0.21	11.27	11.27	11.27	11.27	11.27	9.30	9.30	9.30	9.30	9.30
3.5	20.5	71.75	0.17	10.87	10.87	10.87	10.87	10.87	8.97	8.97	8.97	8.97	8.97
3.5	21	73.50	0.17	11.14	11.14	11.14	11.14	11.14	9.19	9.19	9.19	9.19	9.19

Tabla 16. Fragmento de la tabla general de todas las configuraciones.

3.3. IDENTIFICACIÓN DE PATRONES

En esta sección se organiza la tabla general de todas las configuraciones en diferentes presentaciones para identificar posibles patrones y tendencias de los valores para las potencias de 330 W y 400 W por separado, posteriormente se presenta una serie de tablas de valores percentiles para reconocer algunas características de los valores que aporten otra perspectiva de los datos. Finalmente se exponen algunas observaciones como resultado de los análisis de las gráficas.

En las Figura 61 y Figura 62 se exhiben en forma gráfica los m^2/kW_p de las potencias 330 W y 400 W para cada ángulo de inclinación en función de la proporción anchura/longitud. En las figuras no se puede observar ningún patrón ni tendencia clara entre las dos proporciones, lo que sí se puede vislumbrar es que a medida que se incrementa la inclinación del panel, la proporción m^2/kW_p también lo hace. Esto se explica con la Ecuación (4) ya que la anchura del arreglo aumenta con el ángulo de inclinación.

En esas mismas figuras se grafica una proporción de $10 m^2/kW_p$ para establecer un nivel de referencia que se utiliza comúnmente en los proyectos. Cabe mencionar que la mayoría de las configuraciones en ambas figuras se encuentran por encima del valor de referencia de $10 m^2/kW_p$.

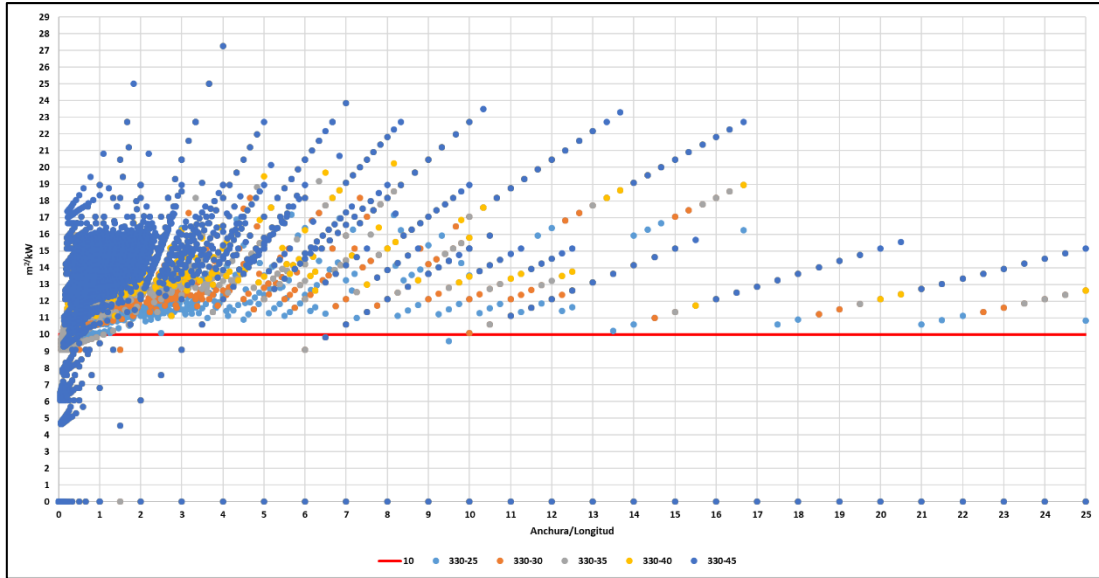


Figura 61. Gráfica m^2/kW_p en función de la proporción ancho/largo para una potencia de 330 W.

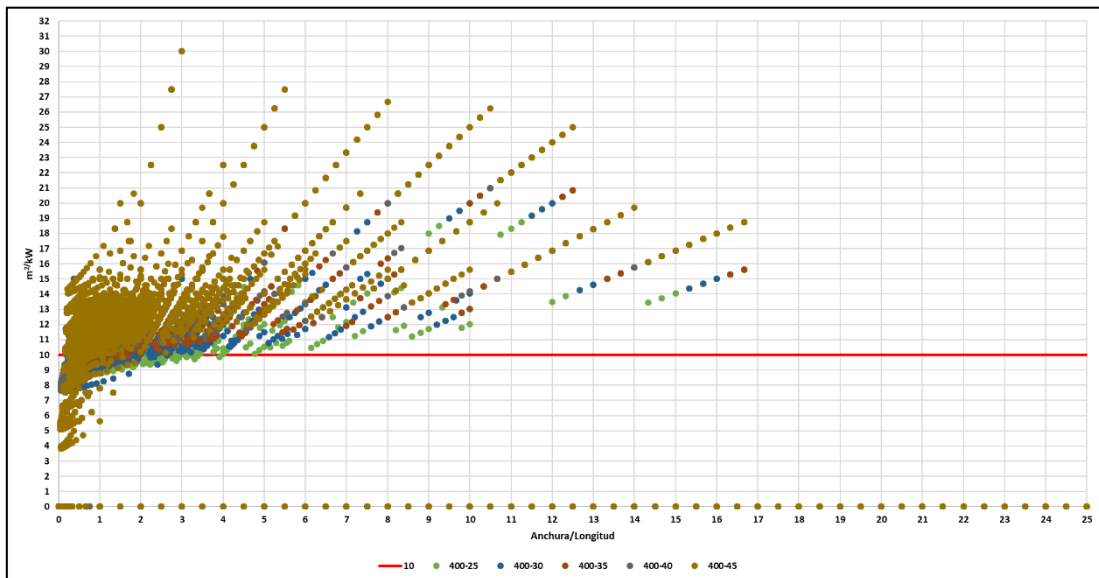


Figura 62. Gráfica m^2/kW_p en función de la proporción ancho/largo para una potencia de 400W.

En las Figura 63 y Figura 64 se grafica la proporción m^2/kW_p en función de la longitud del área para las potencias de 330 W y 400 W con un ángulo de inclinación de 25° y 45°. Una vez más, se puede observar la ligera reducción de m^2/kW_p cuando el ángulo disminuye desde 45° a 25°.

En la Figura 63 se muestra que las dos configuraciones tienen el mismo comportamiento, teniendo en un principio valores grandes (aprox. $19 m^2/kW_p$) y después descienden a valores de la magnitud aproximada constante de $14 m^2/kW_p$ conforme aumenta la longitud del área. A pesar de estas claras tendencias, para un valor determinado de longitud, la magnitud m^2/kW_p abarca un conjunto de valores amplio, si se toma una longitud de 15 metros para la configuración 330 W - 45 varía desde $4,87 m^2/kW_p$ hasta $17,86 m^2/kW_p$.

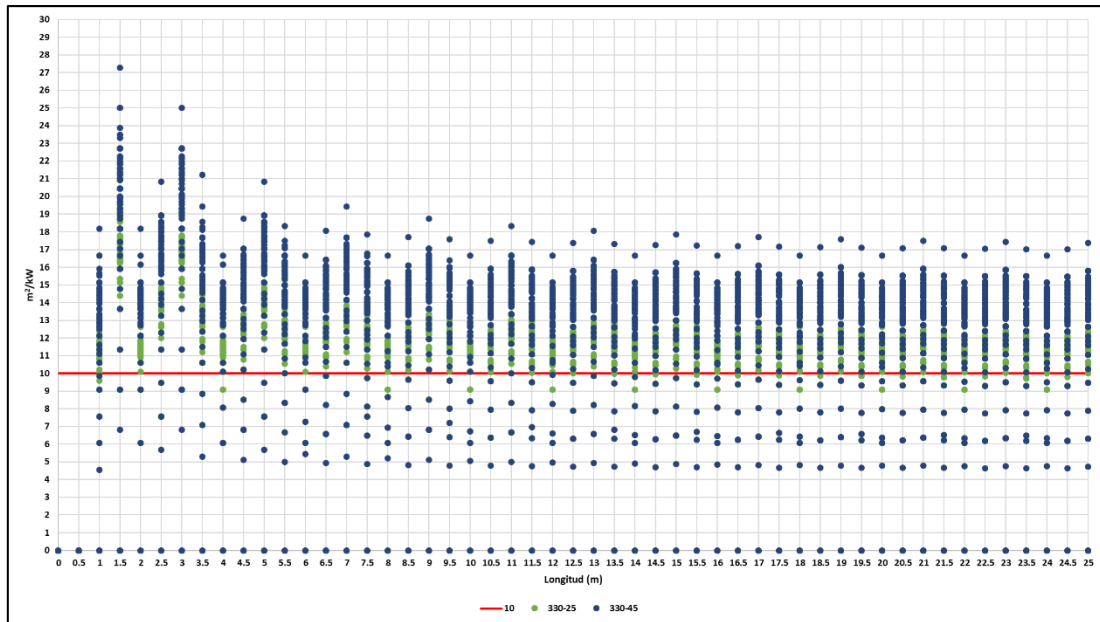


Figura 63. Gráfica m^2/kW_p en función de la longitud del área para las configuraciones 330 W – 25 y 330 W – 45.

En la Figura 64 se puede apreciar que ambas configuraciones siguen el mismo patrón, esto es, partiendo de valores altos (aprox. $18 m^2/kW_p$) a valores bajos constantes (aprox. $11-12 m^2/kW_p$) en promedio a medida que se incrementa la longitud del área. No obstante, para un valor fijo de longitud, la proporción tiene un rango amplio de valores, por ejemplo, para una longitud de 20 m, la proporción m^2/kW_p de la configuración de 400W - 25 varía desde $5,56 m^2/kW_p$ hasta $11,84 m^2/kW_p$.

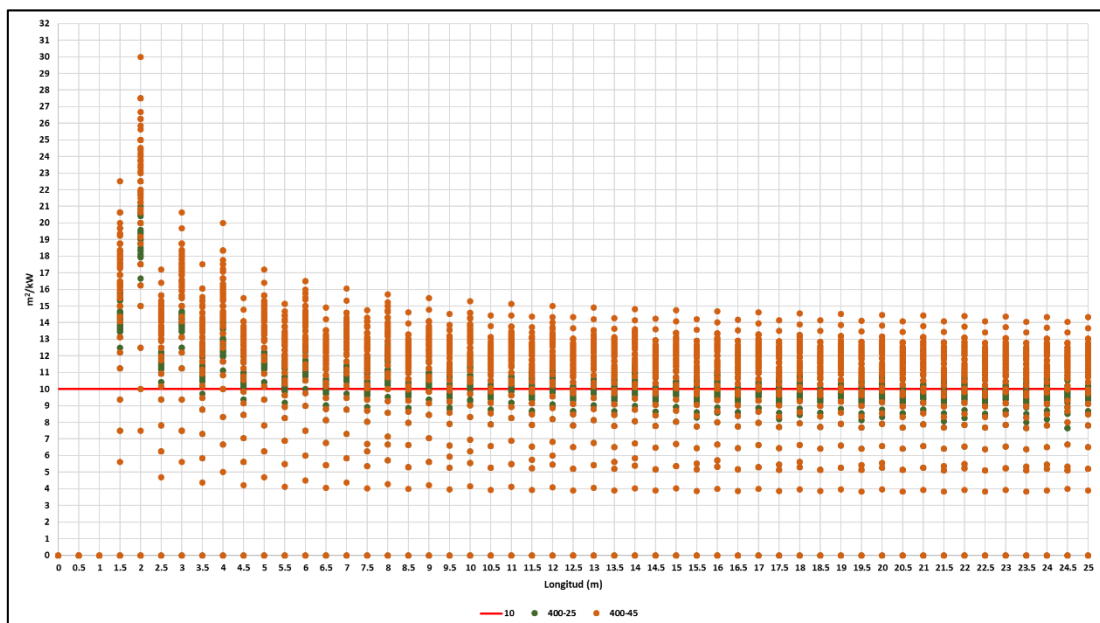


Figura 64. Gráfica m^2/kW_p en función de la longitud del área para las configuraciones 400 W - 25 y 400 W - 45.

De las Figura 63, Figura 64 y las observaciones descritas no es posible establecer una relación matemática directa para estimar la proporción m^2/kW_p en función de la longitud del área para cada configuración, pero se puede deducir que la proporción m^2/kW_p tiende a tomar valores constantes cuando se incrementa la longitud del área. Por tanto, el efecto de la longitud sobre la proporción m^2/kW_p es el mismo para todos los ángulos de inclinación ya que el número de paneles que pueden instalarse en ese parámetro depende únicamente del tamaño del panel y del espacio que se desee dejar entre columnas.

La Figura 65 exhibe la proporción m^2/kW_p en función de la anchura del área para una potencia de 330 W con un ángulo de inclinación de 25° y 45° . Se puede observar que a valores bajos se tienen lecturas menores a $10 m^2/kW_p$, no obstante, las magnitudes incrementan su valor rápidamente hasta alcanzar valores aproximadas de 15 y 18 m^2/kW_p para los ángulos de inclinación de 25° y 45° , respectivamente. También se presenta un patrón de repetición a medida que se aumenta la anchura del área, estos rangos de repetición son de aproximadamente de 4,5 metros, desde valores de $10 m^2/kW_p$ hasta $13,5 m^2/kW_p$ para el caso de 25° de inclinación. Una observación importante es que este rango de valores se mantiene constante y que los valores de m^2/kW_p para el ángulo de inclinación de 25° son menores a sus similares de 45° .

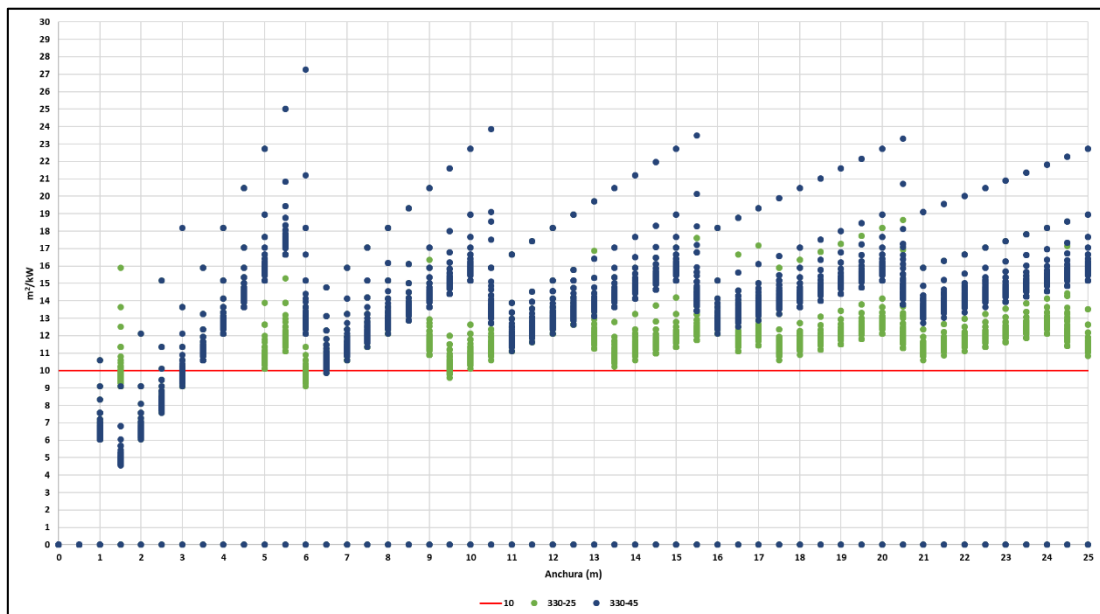


Figura 65. Gráfica m^2/kW_p en función de la anchura del área para las configuraciones 330W – 25 y 330W – 45.

La Figura 66 muestra la proporción m^2/kW_p en función de la anchura del área para una potencia de 400 W con un ángulo de inclinación de 25° y 45° . Nuevamente se puede apreciar la disminución de m^2/kW_p cuando disminuye el ángulo de inclinación. A valores bajos de anchura, la proporción m^2/kW_p tiene valores bajos (por debajo de los $10 m^2/kW_p$), pero a medida que se incrementa un poco más la anchura, los valores m^2/kW_p toma valores más altos hasta cierto límite. Se puede observar que se tiene un patrón de repetición cada cierta distancia. Asimismo, los valores de este patrón de repetición se vuelven aproximadamente constantes a medida que incrementa la anchura.

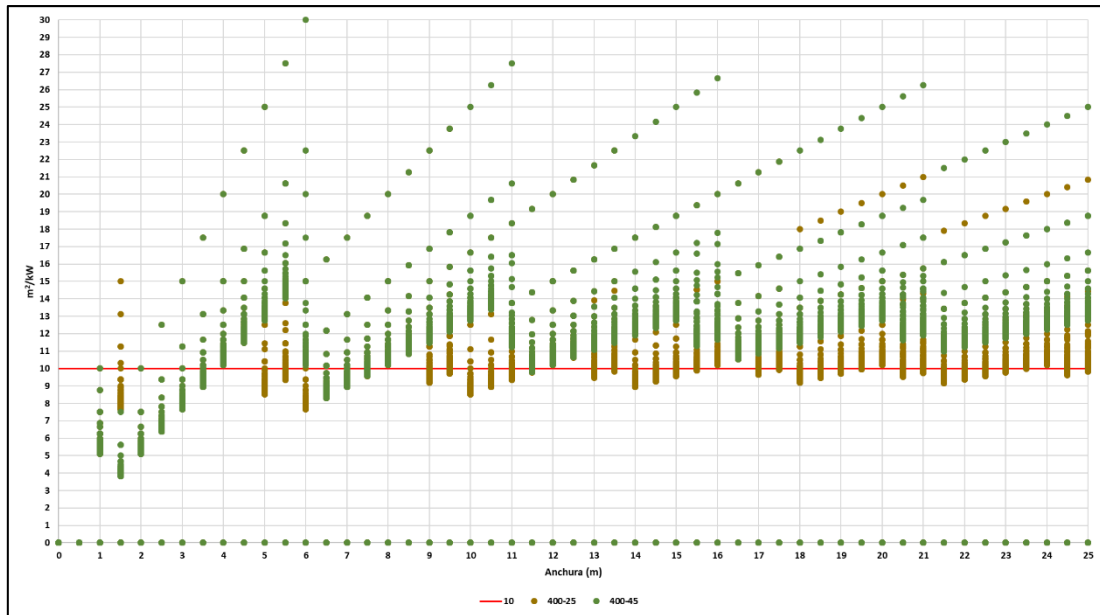


Figura 66. Gráfica m^2/kW_p en función de la anchura del área para las configuraciones 400 W – 25 y 400 W – 45.

No obstante, para un valor fijo de anchura, la proporción tiene un rango amplio de valores, en el caso de una potencia de 330W con un ángulo de inclinación de 45° y para una anchura de 4 m, se tiene un valor mínimo de 12 m^2/kW_p y un valor máximo de 18 m^2/kW_p . Por otro lado, para una anchura de 15 m, la proporción m^2/kW_p de la configuración de 400 W - 25 varía desde 9,58 m^2/kW_p hasta 18,75 m^2/kW_p . Por ende, de manera similar con la longitud, no es posible establecer una relación matemática directa para estimar la proporción m^2/kW_p en función de la anchura del área para cada configuración. En estas figuras, el patrón de repetición se debe al espacio necesario para instalar una fila más de paneles fotovoltaicos, ya que se llega a un punto tal que el área disponible es suficiente y la proporción m^2/kW_p disminuye para incrementar nuevamente hasta que se pueda acomodar otra fila.

En la Figura 67 se muestra los valores m^2/kW_p en función del área superficial para una potencia de 330 W con un ángulo de inclinación de 25° y 45°. La configuración 330W – 25 muestra un amplio rango de valores de m^2/kW_p para superficies menores a 175 m^2 , no obstante, para valores mayores se muestra una cierta tendencia y compactación de los valores m^2/kW_p , es más, cuando el área superficial es mayor a 400 m^2 , los valores m^2/kW_p tienden a un valor constante aproximado de 11,5 m^2/kW_p . En el caso de un ángulo de 45°, se muestra un patrón similar al de 25° pero con valores límite mayores de área superficial, en esta situación, para valores menores a 300 m^2 se tiende un gran rango de valores m^2/kW_p ; y para áreas mayores el valor constante se podría aproximar probablemente a 14 m^2/kW_p , aunque no es tan clara esa tendencia como el caso de 25°. La Figura 68 muestra los valores m^2/kW_p para los ángulos de inclinación de 30°, 35° y 40°. En esta figura se observa nuevamente el mismo patrón teniendo como valores constantes aproximados a 12, 13 y 13,5 m^2/kW_p , respectivamente.

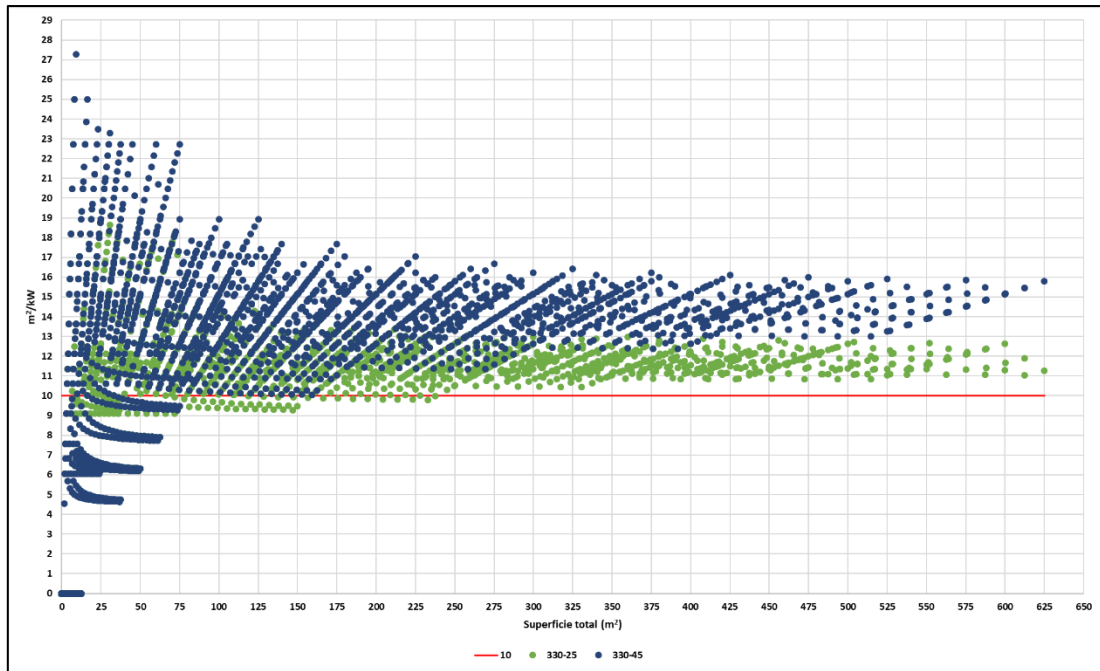


Figura 67. Gráfica m^2/kW_p en función del área superficial para las configuraciones 330W – 25 y 330W – 45.

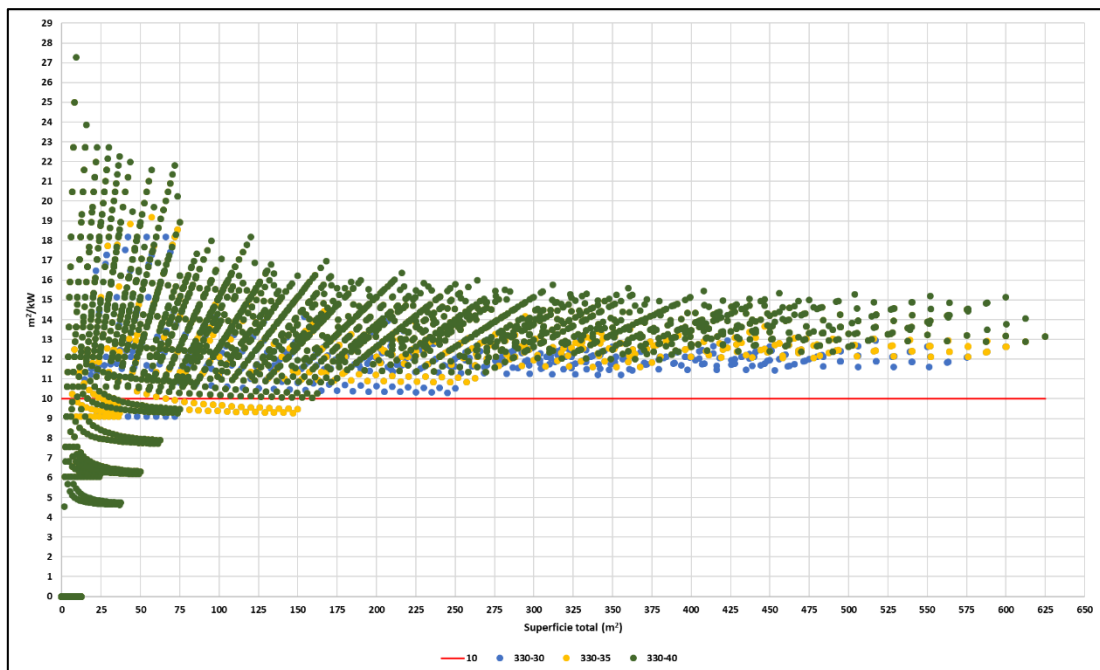


Figura 68. Gráfica m^2/kW_p en función del área superficial para las configuraciones 330W – 30, 330W -35 y 330W – 40.

La Figura 69 expone la proporción m^2/kW_p en función del área superficial para una potencia de 400 W con un ángulo de inclinación de 25° y 45°. En el caso de ángulo de 45°, para valores de área superficial menores a 400 m² existe un amplio rango de valores de la proporción m^2/kW_p , sin embargo, para valores mayores a 400 m² el rango de valores disminuye y se observa una tendencia a un valor constante de 13 m^2/kW_p .

Diseño de una Herramienta Automática de Optimización de Instalación de Paneles Fotovoltaicos en Cubiertas de Edificios

Por otro lado, en el caso de ángulo de 25°, para valores de área superficial menores a 150 m² hay una variación importante de m²/kW_p, no obstante, para valores mayores a 150 m², el rango decrece y se aprecia una tendencia a un valor aproximado de 10 m²/kW_p. Para los ángulos intermedios de 30°, 35° y 40°, las tendencias son 10, 11 y 12 m²/kW_p, respectivamente; como se observa en la Figura 70.

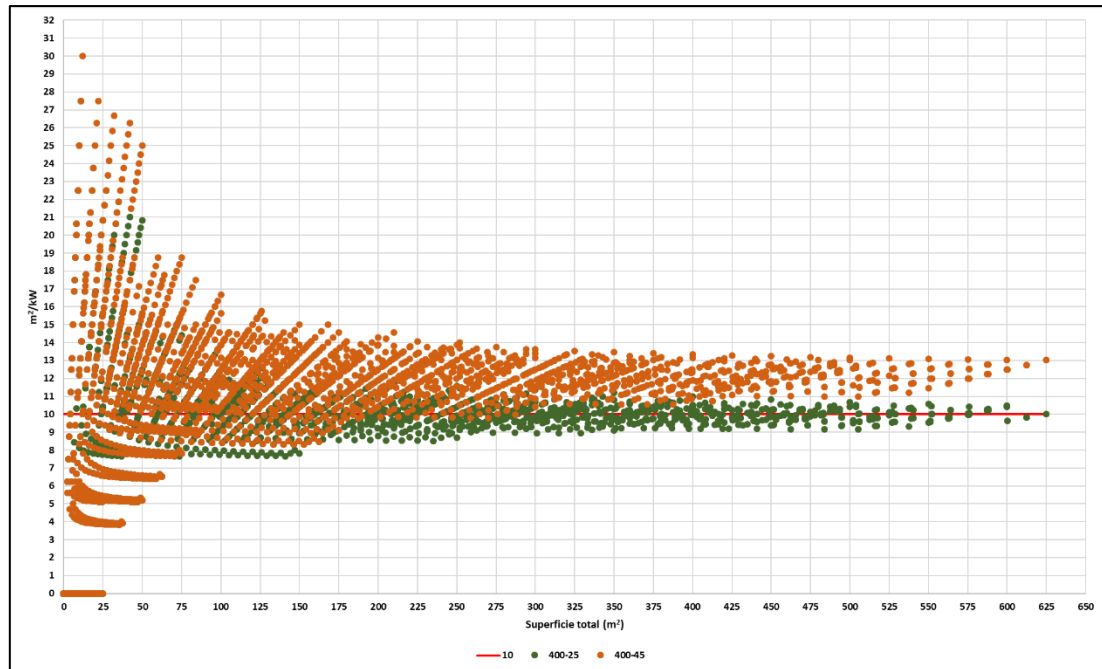


Figura 69. Gráfica m²/kW_p en función del área superficial para las configuraciones 400 W – 25 y 400 W – 45.

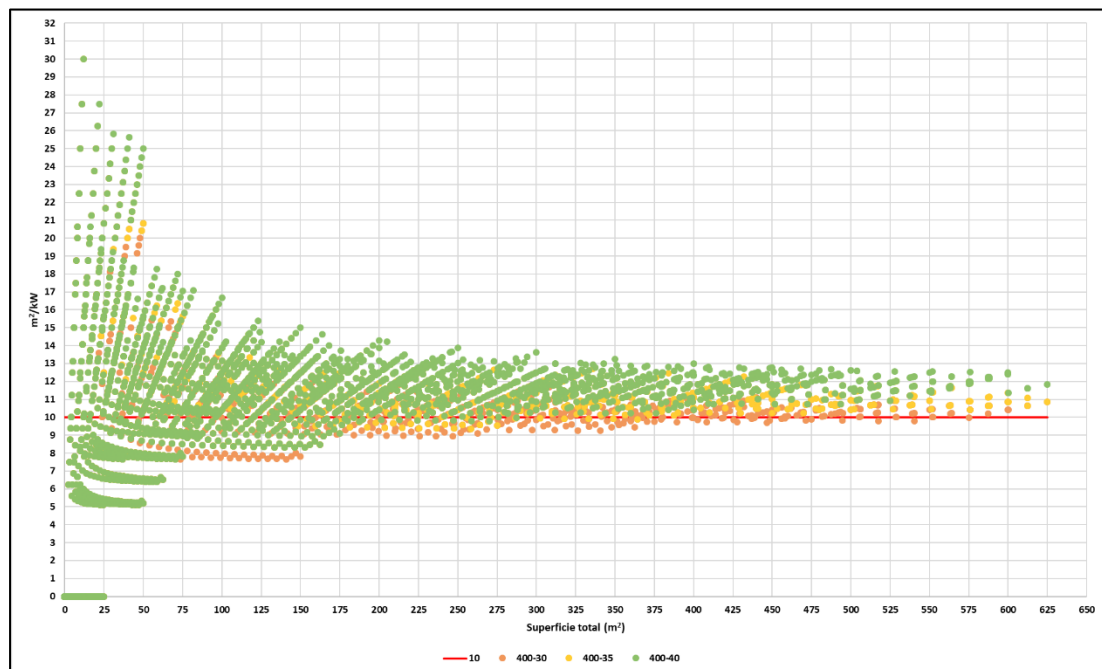


Figura 70. Gráfica m²/kW_p en función del área superficial para las configuraciones 400 W -30, 400 W – 35 y 400 W – 40.

A pesar de las tendencias de los valores constantes m^2/kW_p para áreas superficiales muy grandes, no es posible deducir una relación matemática que estime dichas magnitudes para un determinado valor de área superficial. Una posible explicación de las tendencias es que el efecto de ensombrecimiento entre filas y la instalación de otra fila de paneles se contrarresta parcialmente por la magnitud de la potencia instalada y se sufre un ligero aumento en la proporción m^2/kW_p hasta que el espacio es suficiente para poner otra fila y tender de nuevo al valor constante.

Tras todos el análisis se tiene que no es posible obtener una relación matemática directa que estime los valores m^2/kW_p en función de la longitud, anchura, superficie del área, relación anchura/longitud o alguna combinación de ellas.

Otra manera de presentar los resultados es en función de porcentajes cubiertos por ciertos valores de m^2/kW_p . En la Figura 71 se muestran todas las configuraciones para una potencia de 330 W. Para la configuración 330W-25 el 18% de todos los valores posibles superan los 10 m^2/kW_p , mientras que el 61% de todos los valores superan los 12 m^2/kW_p y el 92% sobrepasan los 14 m^2/kW_p . Por otro lado, en 330W-45 aproximadamente 20% superan los 11 m^2/kW_p y cerca del 73% superan los 15 m^2/kW_p .

330-25	
m^2/kW_p	Percentil
10	18.00%
11	29.60%
12	61.55%
13	85.00%
14	92.55%

330-30	
m^2/kW_p	Percentil
10	17.45%
11	22.79%
12	38.20%
13	69.05%
14	86.30%

330-35	
m^2/kW_p	Percentil
10	17.20%
11	21.40%
12	29.75%
13	52.50%
14	76.50%

330-40	
m^2/kW_p	Percentil
11	19.58%
12	25.45%
13	40.80%
14	63.85%
15	82.50%

330-45	
m^2/kW_p	Percentil
11	19.55%
12	24.45%
13	34.50%
14	53.50%
15	72.50%

Figura 71. Porcentajes cubiertos para valores de m^2/kW_p para una potencia de 330 W.*

De la Figura 71 se puede deducir que los valores de m^2/kW_p dependen no solamente de la geometría del área donde se instalarán los paneles sino de la inclinación del panel fotovoltaico. Asimismo, el rango que engloba a la mayoría de los posibles arreglos es pequeño (desde 10 m^2/kW_p hasta 14 m^2/kW_p para el caso de 25° de inclinación) y los valores de estos rangos se incrementan con el ángulo de inclinación.

En la Figura 72 se exponen todas las configuraciones para un panel con una potencia nominal de 400W. Si se toma la configuración 400W-25 se observa que el 17,45% de los valores superan los 8 m^2/kW_p , mientras que el 89,75% son mayores a 12 m^2/kW_p . En el otro extremo, para un ángulo de inclinación de 45°, el 20,18% de los arreglos sobrepasan los 9 m^2/kW_p y el 75,25% son mayores a 13 m^2/kW_p .

400-25	
m ² /kW _p	Percentil
8	17.45%
9	23.50%
10	49.50%
11	79.20%
12	89.75%

400-30	
m ² /kW _p	Percentil
8	17.50%
9	21.65%
10	34.50%
11	64.50%
12	83.90%

400-35	
m ² /kW _p	Percentil
8	16.44%
9	19.75%
10	27.00%
11	47.50%
12	73.75%

400-40	
m ² /kW _p	Percentil
9	19.40%
10	25.20%
11	38.20%
12	61.30%
13	82.25%

400-45	
m ² /kW _p	Percentil
9	20.18%
10	24.80%
11	34.05%
12	53.75%
13	75.25%

Figura 72. Porcentajes cubiertos para valores de m²/kW_p para una potencia de 400 W.

Similarmente al caso de 330 W, los valores de m²/kW_p dependen del ángulo de inclinación del panel fotovoltaico y el rango que abarca a la mayoría de los arreglos es pequeño (desde 9 m²/kW_p hasta 13 m²/kW_p).

Cabe mencionar que al comparar las Figura 71 y Figura 72 para un mismo ángulo de inclinación, los arreglos de 400 W arrojan valores m²/kW_p menores a sus semejantes de 330 W, esto se puede explicar al hecho de que, aunque las dimensiones de los paneles de 400 W son ligeramente mayores a los de 330 W no son lo suficientemente grandes como para nulificar la ganancia en potencia generada y tener valores m²/kW_p mayores.

Debido al impacto que tiene un pequeño cambio en la proporción m²/kW_p en las primeras estimaciones de la potencia instalada en un área de cubierta dada, se recomienda utilizar la tabla general para una potencia, ángulo de inclinación y características geométricas del área a analizar.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

En un escenario mundial donde el consumo eléctrico es trascendental en el sector de la edificación, la obligación de realizar una transición energética sostenible y cumplir con los objetivos internacionales y locales, el aprovechamiento de la energía renovable, en particular la fotovoltaica, en ambientes urbanos es un área de gran interés tal que, hoy en día, se pueden encontrar diversas metodologías y proyectos con el objetivo de optimizar el arreglo de paneles fotovoltaicos en cubiertas basándose en los datos de radiación solar y sombras proyectadas por obstáculos cercanos. No obstante, la característica principal de todas ellas es la optimización energética; existen muy pocos estudios que analicen la optimización espacial de los paneles fotovoltaicos. Esta fue la premisa del presente trabajo.

Como primer objetivo de este documento fue el de desarrollar una metodología de optimización automática de paneles fotovoltaicos en función de las características propias del panel, su instalación (orientación, colocación e inclinación) y de las características geométricas del área misma tomando como lugar de estudio la ciudad de Valencia. Asimismo, se incluye un apartado de reducción en la emisión de gases contaminantes para dar un enfoque más completo al trabajo, encontrando en su desarrollo varias observaciones.

Para los paneles fotovoltaicos existe una cierta tendencia, conforme pasa el tiempo, de los fabricantes de construir paneles con tamaños “estandarizados”, lo cual se puede observar con paneles de 275 y 300 W; por otro lado, con paneles más recientes existe una pequeña diferencia en las dimensiones de los mismos como es el caso del panel de 400 W.

La diferencia en la generación de energía eléctrica de un panel fotovoltaico con una orientación alineada con el Sur y otro con una orientación diferente no es tan significativa excepto cuando se tienen ángulos de azimut de $\pm 30^\circ$, donde la diferencia es del 6 al 7%.

Dadas las características geométricas del área a analizar, existe la posibilidad de que un arreglo de paneles fotovoltaicos con un ángulo de azimut desfavorable genere más energía que un arreglo con una orientación más convencional. Asimismo, por las mismas características del área, un arreglo con un ángulo de inclinación diferente al óptimo, normalmente más pequeño, puede generar más energía que el óptimo debido al mayor ensombrecimiento entre filas de paneles, y, por ende, mayor espacio necesario.

Aunque una instalación fotovoltaica no genere emisiones contaminantes durante su operación, si lo hace durante las otras fases de su ciclo de vida como son la producción, instalación, transporte y disposición final. De todos los componentes y equipos que participan, son los paneles fotovoltaicos los elementos que más aportan a la emisión de contaminantes debido a su materia prima y medios de producción.

Aunque la evolución de la intensidad contaminante de la red eléctrica española ha ido a la baja, todavía no alcanza los valores que tienen las instalaciones fotovoltaicas en cubiertas de edificios, lo cual significa que desde el punto de vista ambiental, las instalaciones fotovoltaicas en cubiertas siguen siendo muy atractivas hasta el momento, ya sea que los medios de producción y extracción de materia prima sea demasiado contaminante o que la intensidad contaminante de la red eléctrica sea demasiado baja gracias a la gran participación de las energías renovables en la generación de energía eléctrica.

La metodología desarrollada se puede aplicar en los casos que se necesite generar la mayor cantidad de energía en el año, que se consumirá por completo y se recibirá una radiación homogénea en toda el área a analizar. También, dada su naturaleza, esta metodología se puede traducir a cualquier lenguaje de programación.

Una línea posible de continuación de este trabajo es expandir la metodología a otros sitios, encontrar sus relaciones de conversión respectivas y tal vez, encontrar alguna relación entre los distintos grupos de ecuaciones en función de algunos parámetros, por ejemplo, la latitud o la longitud geográficas. Otra línea es la de encontrar las diferentes relaciones de conversión para distintos perfiles de consumo, por ejemplo, en lugar de tener un enfoque de generar la mayor cantidad de energía anual, tomar un perfil de consumo donde la mayor demanda es en invierno. Además, esta metodología se puede integrar con otra que, utilizando fotografías satelitales y datos de radiación solar, identifique las áreas rectangulares disponibles que necesita la metodología de este trabajo.

En las etapas tempranas de un proyecto se utilizan ciertos parámetros para estimar la viabilidad del mismo, uno de estos parámetros es la relación m^2/kW_p , cuyo valor depende de la fuente consultada y no hay estudios que justifiquen estos valores salvo la experiencia adquirida al instalar los paneles fotovoltaicos. Por ende, el segundo objetivo de este trabajo fue encontrar valores m^2/kW_p en función de las diferentes características del panel fotovoltaico, su forma de instalar (orientación, colocación e inclinación) y del área misma.

La dimensión más importante de un área es su anchura ya que es donde se presentan los cambios más grandes en los valores de m^2/kW_p debido al espacio requerido para evitar el ensombrecimiento entre filas de paneles fotovoltaicos. Dichos cambios son más pronunciados cuando se incrementa el ángulo de inclinación. Por otro lado, el efecto de la longitud sobre la proporción m^2/kW_p es el mismo para todos los ángulos de inclinación ya que el número de paneles que pueden instalarse en ese parámetro depende únicamente del tamaño del panel y del espacio que se desee dejar entre columnas.

Si el área superficial toma valores muy grandes, se pueden observar ciertas tendencias de la proporción m^2/kW_p hacia valores relativamente constantes. También se puede ver cierta tendencia a un valor medio cuando se incrementa la longitud del área.

Por otro lado, en el caso de la anchura, la proporción m^2/kW_p tiene un comportamiento cíclico, sin embargo, si se toma un valor de anchura en específico el rango de valores m^2/kW_p es muy amplio como para obtener un valor único aproximado ya que una pequeña variación en m^2/kW_p tiene un gran impacto en la estimación de potencia instalada y, por ende, en la generación de energía eléctrica.

Al comparar los mismos valores porcentuales cubiertos de las potencias nominales de 330 y 400 W para un ángulo de inclinación constante se tienen que la proporción m^2/kW_p es menor para un panel de 400 W, esto se debe que, aunque se tiene un ligero aumento en las dimensiones geométricas de este panel, es mucho mayor el efecto del incremento de la potencia nominal y al final se tiene un mayor beneficio en la estimación de potencia instalada en cubiertas. Este hecho justifica la investigación y tendencia actual que fabricar paneles fotovoltaicos con mayor potencia a pesar de contar con un ligero incremento en su tamaño geométrico.

No es posible obtener una relación matemática directa que estime los valores m^2/kW_p en función de la longitud, anchura, superficie del área, relación anchura/longitud o alguna combinación de ellas.

Debido al impacto que tiene un pequeño cambio en la proporción m^2/kW_p en las primeras estimaciones de la potencia instalada en un área de cubierta dada, se recomienda utilizar la tabla general para una potencia, ángulo de inclinación y características geométricas del área a analizar.

CAPÍTULO 5. BIBLIOGRAFÍA

1. Eurostat. *Primary Energy Consumption*. [En línea] https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=sdg_07_10&language=en. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].
2. Eurostat. *Final Energy Consumption*. [En línea] https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=sdg_07_11&language=en. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].
3. Eurostat. *Share of Renewable Energy in Gross Final Energy Consumption by Sector*. [En línea] https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=sdg_07_40&language=en. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].
4. Eurostat. *Greenhouse Gas Emissions Intensity of Energy Consumption*. [En línea] https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcode=sdg_13_20. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].
5. European Commission. *2030 Climate & Energy Framework*. [En línea] https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].
6. Eurostat. *Final Energy Consumption by Sector*. [En línea] <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=ten00124&language=en>. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].
7. IDAE. *Balance de Consumo de Energía Final*. [En línea] <http://sieweb.idae.es/consumofinal/bal.asp?txt=Residencial&tipbal=s&rep=1>. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].
8. IDAE. *Informe Anual de Consumos Energéticos. Evolución 2010-2018*. [En línea] https://www.idae.es/sites/default/files/estudios_informes_y_estadisticas/cons_usos_resid_eurostat_web_2010-18_ok.xlsx. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].
9. IDAE. *Proyecto SECH-SPAHOUSEC*. [En línea] https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Informe_SPAHOUSEC_ACC_f68291a3.pdf. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].
10. IVACE. *Datos Energéticos de la Comunitat Valenciana 2017*. [En línea] <https://www.ivace.es/index.php/val/documents/descarregues/func-startdown/4988/lang,ca-es/>. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].
11. Ayuntamiento de Valencia. *PACES*. [En línea] <https://www.valencia.es/ayuntamiento/energias.nsf/0/FB97C75EE481E93DC125840200442A2>

2/\$FILE/190415_AYTO_VALENCIA_PACES__Actualizado_.pdf?OpenElement&lang=1. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].

12. Red Eléctrica de España. *Las Energías Renovables en el Sistema Eléctrico Español 2019*. [En línea] https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/Renovables-2019.pdf. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].

13. UNEF. *El Sector Fotovoltaico hacia una Nueva Era*. [En línea] <https://i0.wp.com/unef.es/wp-content/uploads/2020/07/portada-informe-anual-unef-2020.png?fit=595%2C841&ssl=1>. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].

14. ANPIER. *Anuario Fotovoltaico 2020*. [En línea] <https://anpier.org/wp-content/uploads/2020/09/ANUARIO-ANPIER-2020.pdf>. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].

15. BOE. *RD 23/2020*. [En línea] <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-6621&p=20200624&tn=1#a2>. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].

16. IRENA. *Renewable Power Generation Costs in 2019*. [En línea] https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].

17. LAZARD. *Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis - Version 13.0*. [En línea] <https://www.lazard.com/media/451086/lazards-levelized-cost-of-energy-version-130-vf.pdf>. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].

18. Las Naves, Climate KIC y la Cátedra de Transición Energética Urbana. [En línea] <https://www.lasnaves.com/wp-content/uploads/2017/08/Tecnical-report-WP2-IIE.pdf>. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].

19. Instituto Enerxético de Galicia. *Inega. Información, preguntas frecuentes, energía solar fotovoltaica*. [En línea] http://www.inega.gal/informacion/preguntas_frecuentes/enerxia_solar_fotovoltaica.html?idioma=es. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].

20. Grupotech. *Posibilidades de implantación de instalaciones fotovoltaicas en la industria valenciana*. [En línea] <https://www.camaravalencia.com/es-ES/competitividad/medioambiente-energia/Documents/PONENCIA%20GRUPOTEC.pdf>. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].

21. Asociación de Agencias Españolas de Gestión de la Energía (EnerAgen). *Autoconsumo al detalle*. [En línea] <http://www.autoconsumoaldetalle.es/nuestra-web/>. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].

22. *Spatial Layout Optimization for Solar Photovoltaic (PV) Panel Installation*. Zhong, Q y Tong, D. s.l. : Renewable Energy, Vol. 150, págs. 1-11.

23. IDAE. *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red*. [En línea] https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_5654_FV_pliego_condiciones_tecnicas_instalaciones_conectadas_a_red_C20_Julio_2011_3498eaaf.pdf. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].

24. PVGIS. [En línea] https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].
25. Standardization, International Organization. *ISO 14040:2006*.
26. *Life cycle assessment study of a 4.2 kWp stand-alone photovoltaic system*. García-Valverde, R., y otros. 9, s.l. : Solar Energy, 2009, Vol. 83, págs. 1434-1445.
27. European Environment Agency. [En línea] https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-5#tab-googlechartid_chart_11_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_ugeo%22%3A%5B%22Spain%22%5D%7D%7D. [Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020].

ANEXOS

ANEXO A VALORES M²/KW_p

En este anexo se muestran los valores m²/kW_p para áreas que varían su longitud y anchura desde 0 metros hasta 25 en incrementos de 0,5 metros para potencias de paneles de 330 y 400 W con ángulo de inclinación de 25°, 30°, 35°, 40° y 45°.

