



# **ARQUITECTURA TEXTIL FOTOVOLTAICA**

**DESARROLLO DE SISTEMAS LIGEROS CON GENERACIÓN SOLAR**

**LUCÍA RODRÍGUEZ MUÑOZ**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



TRABAJO DE FIN DE GRADO

**Lucía Rodríguez Muñoz**

*Arquitectura textil fotovoltaica:*

*Desarrollo de sistemas ligeros con generación solar*



*“My hope is that light, flexible architecture might bring about a new and open society.”*

- Frei Otto, 2003

ARQUITECTURA TEXTIL FOTOVOLTAICA:

DESARROLLO DE SISTEMAS LIGEROS CON GENERACIÓN SOLAR

*Estudiante*

Lucía Rodríguez Muñoz

Expediente 19334

*Tutor*

Lorenzo Olivieri

Departamento de Construcción y Tecnologías Arquitectónicas

*Aula TFG 2*

Beatriz Arranz Arranz

Andrea Alonso Ramos

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

© de los textos, dibujos y diagramas

Lucía Rodríguez Muñoz

## AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, Lorenzo Olivieri, por su dedicación y guía en este proceso.

A Javier Tejera Parra, por descubrirme el mundo de la arquitectura textil y apoyarme en este trabajo, y a Marian de BATSPAIN por la ayuda brindada.

A José María, profesor de bachillerato, por enseñarme en su día lo que significa la *resiliencia*, un concepto que he recordado ante cada desafío a lo largo de estos años.

A mis padres, Julio y Amparo, y a mi hermana, Diana, por apoyarme en cada paso de este largo camino.



# ÍNDICE

<b>RESUMEN Y PALABRAS CLAVE</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>1. ESTADO DEL ARTE: ANTECEDENTES</b>	<b>15</b>
1.1. En sistemas tensados	
1.2. En sistemas neumáticos	
1.3. En mallas de cables	
1.4. En el propio tejido	
1.5. Exploración de soluciones emergentes	
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>29</b>
<b>3. ANÁLISIS DE SOLEAMIENTO DE LA PUERTA DEL SOL</b>	<b>33</b>
<b>4. PROPUESTA 1: INTEGRACIÓN SOBRE MEMBRANA</b>	<b>39</b>
4.1. Diseño formal y estructural	
4.2. Integración, patronaje y configuración	
4.3. Diseño eléctrico y producción esperable	
<b>5. PROPUESTA 2: INTEGRACIÓN EN MALLA DE CABLES</b>	<b>51</b>
5.1. Diseño formal y estructural	
5.2. Fijación y configuración	
5.3. Diseño eléctrico y producción esperable	
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO DE TABLAS</b>	<b>65</b>
A. Producción eléctrica estimada de la Propuesta 1: análisis por bastidor.	
B. Producción eléctrica estimada de la Propuesta 2: análisis por sector.	
<b>ANEXO DE PLANOS E IMÁGENES</b>	<b>75</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>83</b>
<b>PROCEDENCIA DE IMÁGENES</b>	<b>87</b>



## RESUMEN

Este trabajo de fin de grado investiga el potencial de la arquitectura textil como soporte para la integración de sistemas fotovoltaicos, combinando estrategias de sombreado pasivo con generación activa de energía en el espacio urbano. Como caso de estudio se escoge la Puerta del Sol de Madrid, un entorno emblemático con claras deficiencias bioclimáticas, donde se propone una intervención que responda tanto a las condiciones ambientales del lugar como a sus exigencias funcionales y simbólicas.

El desarrollo del proyecto se articula en torno a dos propuestas: una basada en membranas textiles tensadas con integración de módulos fotovoltaicos ligeros, y otra basada en una malla de cables tensados sobre la que se fijan vidrios fotovoltaicos. Ambas soluciones son diseñadas, modeladas y analizadas desde un enfoque técnico y urbano, abordando aspectos como la forma, el sistema estructural, el patrón de colocación de los módulos, el comportamiento energético y la viabilidad constructiva.

El trabajo se apoya en herramientas de soleamiento, modelado 3D, renderizado, patronaje, simulación solar, análisis energético y evaluación comparativa. Además, se contextualiza dentro de una revisión crítica del estado del arte, y se exploran futuras líneas de investigación vinculadas a materiales fotovoltaicos emergentes y nuevos modelos de integración en arquitectura ligera.

## PALABRAS CLAVE

ARQUITECTURA TEXTIL // FOTOVOLTAICA // FLEXIBLE // LIGERO // SOSTENIBILIDAD



# INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción, actualmente, supone el 37% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> y el 34% de la demanda energética, convirtiéndolo en el sector más contaminante de la industria.<sup>[1]</sup>

En este contexto, donde es imprescindible buscar y desarrollar nuevas soluciones sostenibles, surge esta investigación: explorar las sinergias entre la arquitectura textil y los sistemas fotovoltaicos, con el objetivo de analizar las posibilidades de mejorar la eficiencia energética de los edificios, así como disminuir su coste, tanto energético como económico.

Es en 2023, a través de la asignatura optativa Arquitectura Textil, del Taller Experimental 2, cuando descubro el gran potencial de esta disciplina y su capacidad para transformar el diseño arquitectónico.

La arquitectura textil, también conocida como arquitectura tensada, se basa en el uso de membranas ligeras y flexibles, sostenidas por tensiones internas, cables, mástiles e incluso sistemas neumáticos, permitiendo diseños innovadores con una alta libertad formal. Sus aplicaciones abarcan desde cubiertas en espacios públicos o privados, hasta soluciones temporales, así como fachadas.

Estas arquitecturas destacan por su eficiencia estructural, sostenibilidad y viabilidad económica, ya que reduce el uso de otros materiales homólogos considerablemente más pesados, como el vidrio, y más contaminantes, como pueden ser el acero o el hormigón.

Las obras de arquitectura textil, en su mayoría tienen como objetivo cerrar un espacio y/o proporcionar sombra a la superficie que subyace. Esta exposición al sol permite a estas estructuras ser dotadas de una nueva función productiva mediante la integración de la tecnología fotovoltaica: se convierten en elementos de doble función, sombreadores y generadores de energía.

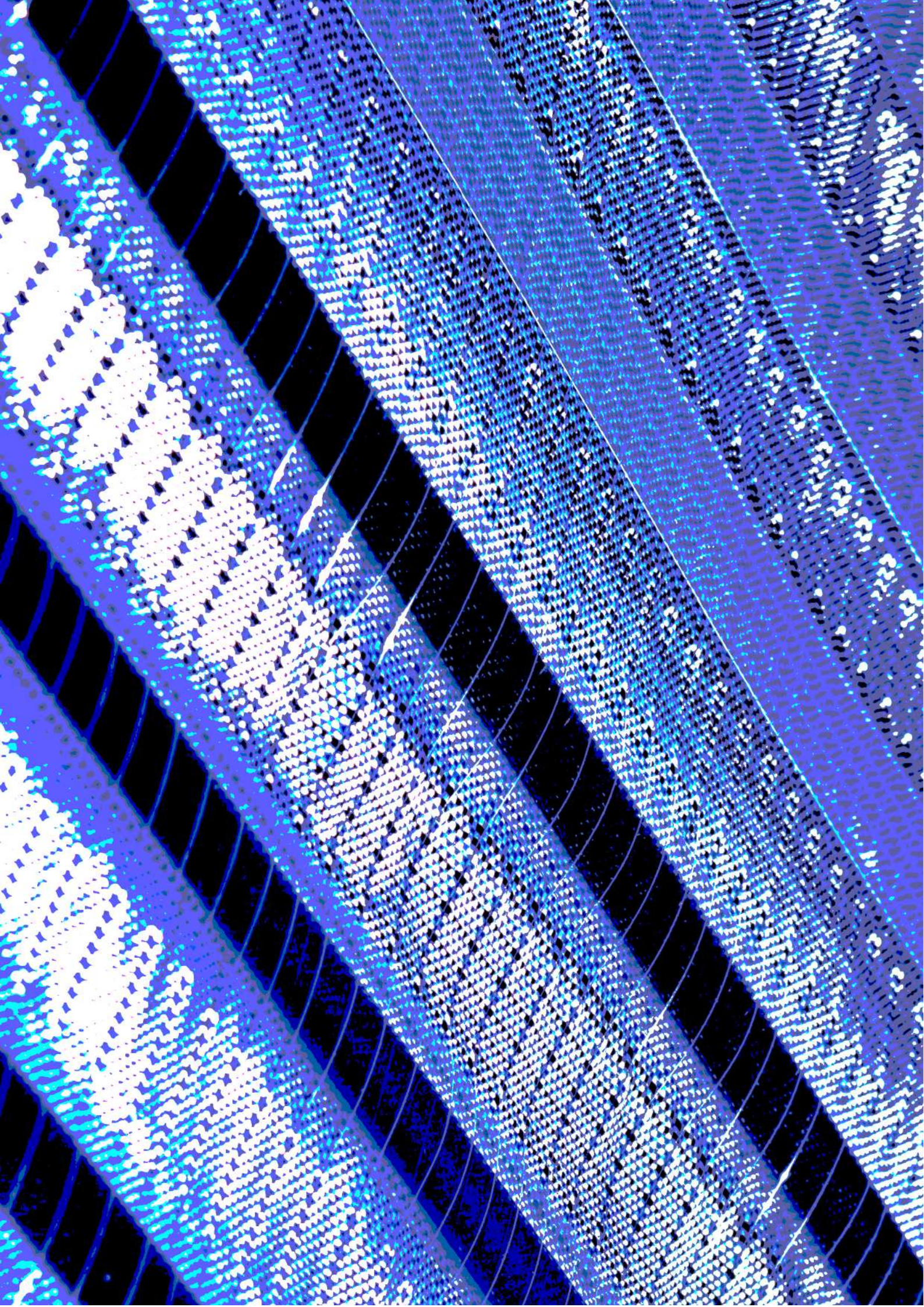
De esta manera, no solo mejoraríamos la eficiencia y ahorro energético de dichos sistemas, sino de toda edificación en la que se integre esta arquitectura textil fotovoltaica, contribuyendo a la sostenibilidad y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente en energía limpia (ODS 7) y ciudades sostenibles (ODS 11).

[1] UNEP y Global ABC: Beyond foundations - Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector.

Este trabajo pretende explorar el potencial de la arquitectura textil fotovoltaica, valorando sus posibilidades y proponiendo dos innovadores sistemas de estructuras tensadas que integran generación de energía solar. Para ello, en el primer capítulo se realiza un análisis del estado del arte de las tecnologías fotovoltaicas aplicadas a sistemas ligeros de membranas tensadas, hinchadas, mallas de cables e incluso tejido fotovoltaico. En el capítulo 2 se presenta la metodología de trabajo utilizada, combinando análisis documental, modelado digital y simulaciones energéticas. El capítulo 3 se centra en el estudio de solemamiento de la Puerta del Sol, espacio donde se desarrollan ambas propuestas, evaluando su viabilidad solar y sus condicionantes urbanos. El capítulo 4 desarrolla la primera propuesta: un sistema de membranas textiles que integran módulos fotovoltaicos ligeros y sin vidrio, priorizando la ligereza, adaptabilidad y sostenibilidad material. El capítulo 5 aborda una segunda propuesta alternativa basada en la incorporación de vidrio fotovoltaico en mallas de cables tensados, explorando una solución estructural distinta que mantiene el mismo contexto urbano, pero con un enfoque más tectónico y de integración visual estructural.

Finalmente, este trabajo se cierra con un capítulo de conclusiones donde se comparan ambas propuestas desde una perspectiva energética, estructural, formal y económica, valorando sus fortalezas, limitaciones y oportunidades de aplicación en entornos urbanos reales. A través de este análisis, se pretende no solo demostrar la viabilidad técnica de la arquitectura textil fotovoltaica, sino también visibilizar su potencial como estrategia integral de intervención urbana, capaz de generar sombra, mejorar el confort climático y producir energía limpia en el corazón de la ciudad.





# 1. ESTADO DEL ARTE: ANTECEDENTES

En los últimos años se han desarrollado diversas construcciones, prototipos e investigaciones que integran la tecnología fotovoltaica en la arquitectura textil. Podemos clasificar estos avances y estudios en cuatro tipologías, en función de en qué tipo de arquitectura tensada se integre la fotovoltaica en cada caso.

## 1.1. En sistemas tensados

La aplicación más directa e intuitiva de la tecnología fotovoltaica en la arquitectura textil es la instalación de láminas fotovoltaicas flexibles sobre las membranas textiles tensadas o traccionadas.

Fue en 1998 cuando se integraron por primera vez captadores solares sobre una estructura tensada en la exposición *Under the Sun: An Outdoor Exhibition of Light*, del Museo Nacional de Diseño Cooper-Hewitt. *FTL Design Engineering Studio* diseñó un doble parabolóide hiperbólico, utilizando una membrana textil con módulos fotovoltaicos ligeros, o *thin-film*, de silicio amorfo de apenas 0,13 mm de espesor, encapsulados y laminados sobre cada uno de los patrones del dicho textil [2]. Las láminas solares eran estrechas y se orientaban con su lado largo siguiendo una de las curvaturas del parabolóide, de tal manera que sufriesen la mayor deformación en ese sentido, y una menor deformación en su lado corto.

Una obra pionera en la arquitectura textil fotovoltaica que marcó un hito en el desarrollo de estructuras ligeras y autosuficientes energéticamente.

[Fig. 01] Estructura textil de *FTL Design Engineering Studio*.



[2] F. Klassen, «Material Innovations: Transparent, light-weight, malleable & responsive», p. 14.

Siguiendo la cronología de esta sección, en 2013, el estudio *SDA Syntesis Design + Architecture* ganó el concurso *Switch to Pure Volvo* organizado por la revista *The Plan*, con el concepto de un pabellón que constituye una estación de carga para el (entonces) nuevo automóvil híbrido enchufable Volvo V60.

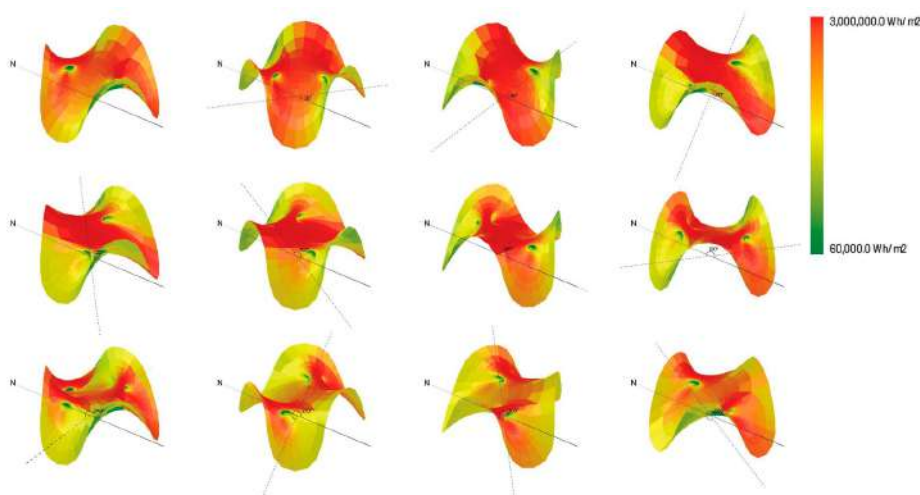


[Fig. 02] Pure Tension Pavilion.

El pabellón consiste en una membrana tensada de HDPE (*High Density PolyEthylene*, polietileno de alta densidad), pequeños módulos fotovoltaicos integrados en ésta y un anillo perimetral de fibra de carbono. Las uniones de la piel mediante cremalleras consiguen que la estación sea totalmente portátil: el anillo se desmonta por piezas, la tela se pliega y todo se puede guardar en el maletero del vehículo; cuando se desee, todo se puede volver a montar en menos de una hora.

Los 252 módulos fotovoltaicos consisten en láminas fotovoltaicas flexibles adosadas a unas teselas de vinilo. El patrón fotovoltaico es el resultado de un análisis de incidencia solar en la estructura: teniendo en cuenta la incidencia solar promedio anual de la piel en 360 grados, se mapearon ubicaciones de mayor incidencia solar promedio anual.

[3]



[Fig. 03] Análisis solar de la geometría en 12 orientaciones.

[3] A. Huang, S. Lewis, y J. Gillette, «Pure Tension: Intuition, Engineering & Fabrication», CAADRIA, pp. 171-180.

A partir del estudio del soleamiento, se generó el patronaje de la tela, teniendo en cuenta la ubicación y dimensiones de las teselas vinílicas. La estación portátil puede generar alrededor de 450 vatios (W) de energía en condiciones óptimas de sol, lo que permite recargar la batería del vehículo, estando ésta completamente descargada, en aproximadamente 12 horas.

Esta pieza es un gran ejemplo del alcance de la tecnología fotovoltaica unida a la arquitectura textil efímera: portátil, ligera, reducida escala y sostenible.

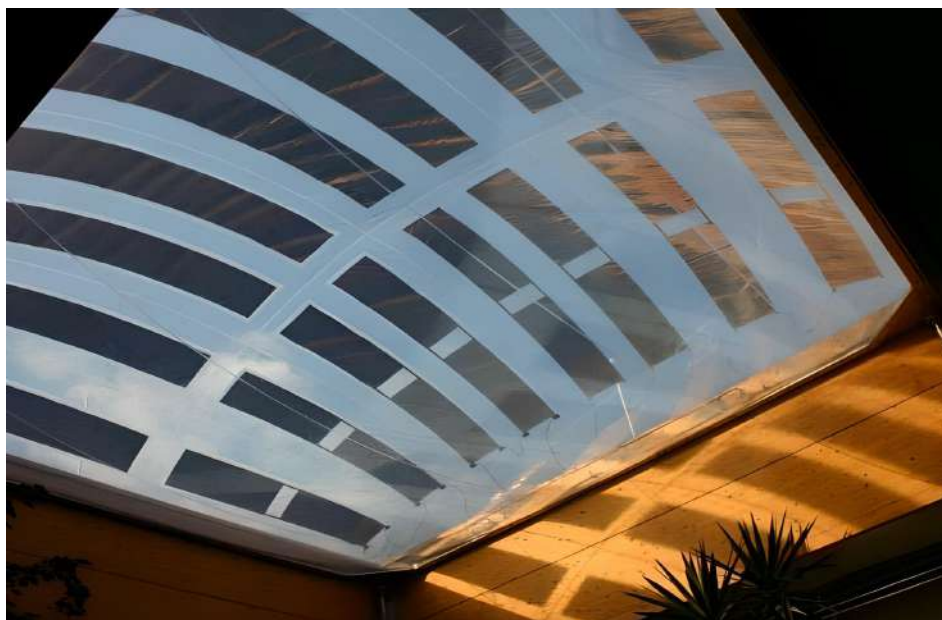
### 1.2. En sistemas neumáticos

La integración de películas fotovoltaicas en una estructura hinchable se implementó por primera vez en Rimsting, en el edificio de oficinas *Hightex* en 2007, como cubierta del área de recepción y reuniones [4]. Se utilizó un cojín de doble capa de ETFE (etileno tetrafluoroetileno), con unas dimensiones de 5 × 5 metros, parcialmente cubierto —un 37% de la capa exterior— con láminas solares flexibles de silicio amorfo (a-Si), que cubrían un total de 9,3 m<sup>2</sup> del cojín. Jan M. Cremers menciona que: «These complex laminates can be joined to larger sheets or applied in membrane material and be used on single layer roofs or facades. They can also be used to replace for example the top-layer in pneumatic cushions»<sup>i</sup>. [5]

[Fig. 04] Cojín de ETFE en el edificio de oficinas Hightex.

[4] A. Menéndez et al., «A multifunctional ETFE module for sustainable façade lighting: Design, manufacturing and monitoring» p. 11.

[5] J. M. Cremers, «Energy saving design of membrane building envelopes», p. 153.



<sup>i</sup> Traducción propia: «Estos laminados complejos pueden unirse a láminas más grandes o aplicarse en materiales de membrana para ser utilizados en cubiertas de una sola capa o fachadas. También pueden reemplazar, por ejemplo, la capa superior en cojines neumáticos»

En el marco de la Expo Universal de Shanghái en 2010, cuyo tema fue *Better City - Better Life*, el pabellón de Japón, *Kaiko-jima* (en japonés, *Isla del gusano de seda*) se presentó como un ejemplo destacado de arquitectura sostenible y de vanguardia. El objetivo principal del proyecto era demostrar cómo la arquitectura puede contribuir de forma activa a la sostenibilidad energética mediante la incorporación de tecnologías limpias y materiales innovadores. [6]

Uno de los elementos más innovadores de su diseño fue la incorporación de tecnología fotovoltaica, en este caso, dentro de los cojines de ETFE de doble capa, que formaban la envolvente del pabellón. Las células fotovoltaicas de silicio amorfo se ubicaron en la superficie interior de la capa inferior de los cojines.



[Fig. 05] El pabellón de Japón en la Expo de Shanghái, 2010.

La energía generada por los módulos solares se utilizó para cubrir parcialmente las necesidades del propio pabellón, reforzando así su carácter autosuficiente y respetuoso con el medio ambiente. Entre los usos principales de esta energía destacaba la iluminación del pabellón mediante LEDs durante la noche, así como el aprovechamiento del aire caliente contenido en el interior de los cojines como fuente de energía térmica. Este aire se calentaba durante el día a causa del efecto invernadero, al quedar atrapada la radiación solar, y también por el calor generado por las propias células fotovoltaicas. [7]

La misma lógica de integración energética en sistemas ligeros de ETFE fue adoptada, un año más tarde, en un contexto diferente: el rediseño de la cubierta de una cochera de la empresa de gestión de residuos, AWM, en Múnich (Alemania), con el fin de reemplazar a la estructura anterior, que colapsó parcialmente en 2006 tras una fuerte nevada.

[6] M. Ohno, «Structural Design of the Japan pavilion in Shanghai Expo».

[7] Q. Li y A. Zanelli, «A review on fabrication and applications of textile envelope integrated flexible photovoltaic systems».

AWM aprovechó la reconstrucción como oportunidad para convertir la cubierta en una innovadora estructura fotovoltaica, con un impacto significativo en sostenibilidad y protección climática. El nuevo sistema de cubierta, diseñado por Ackermann y Partner y construido por Taiyo Europe GmbH en 2011, consiste en una estructura de acero que sostiene 220 cojines neumáticos de ETFE de triple capa. La superficie de captación fotovoltaica abarca unos 3.500 m<sup>2</sup>, con una potencia de 145 kWp y un rendimiento estimado de 900 kWh/kWp al año. [8]

[Fig. 06] Cubierta de la cochera de AWM, Múnich.



Cada cojín incorpora 12 módulos fotovoltaicos flexibles de silicio amorfo fijados a la capa intermedia mediante conectores mecánicos que permiten cierta movilidad, evitando que los módulos estén sometidos a esfuerzos de tracción, flexión o cortante. La capa intermedia, además, está pretensada para evitar arrugas y no soporta cargas gracias a las aberturas de ventilación, que equilibran la presión del aire entre las cámaras superior e inferior del cojín [8]. Los módulos también sirven para sombrear el nivel del garaje y contrarrestar así el sobrecalentamiento en verano.

[Fig. 07] Interior de la cochera de AWM, Múnich.

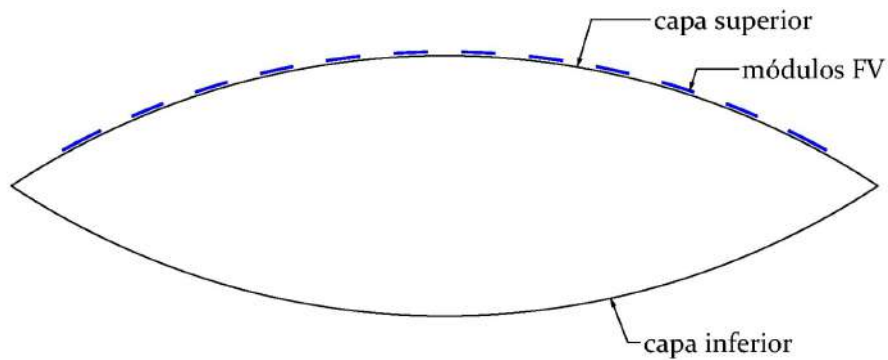


[8] K.U. Bletzinger, Bernd. Kröplin, y Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, «Innovative membrane architecture for carport in Munich».

En conjunto, el proyecto de AWM se presenta como un ejemplo avanzado de integración fotovoltaica en arquitectura textil, donde la tecnología solar no solo se adapta a una estructura ligera e inflable, sino que también forma parte esencial de su diseño técnico y ambiental.

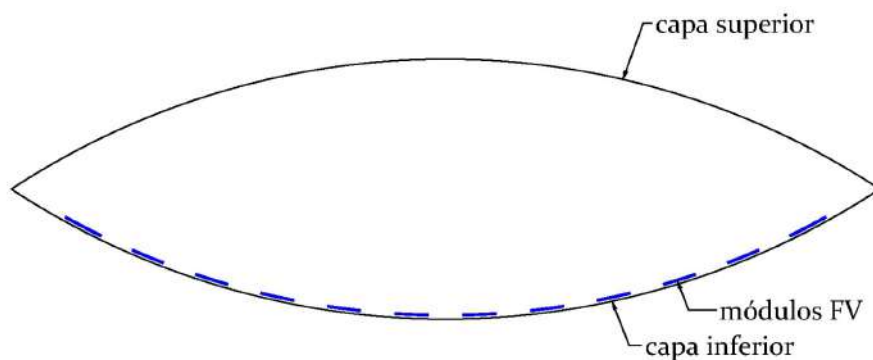
Los tres casos expuestos anteriormente muestran distintas estrategias para la integración de módulos fotovoltaicos en cojines de ETFE, dependiendo de la capa en la que se instalan.

Su colocación en la capa superior, como en el caso de Hightex de Rimsting, optimiza la exposición directa a la radiación solar, aunque los deja más vulnerables al deterioro por agentes externos como el viento, el granizo o la suciedad.



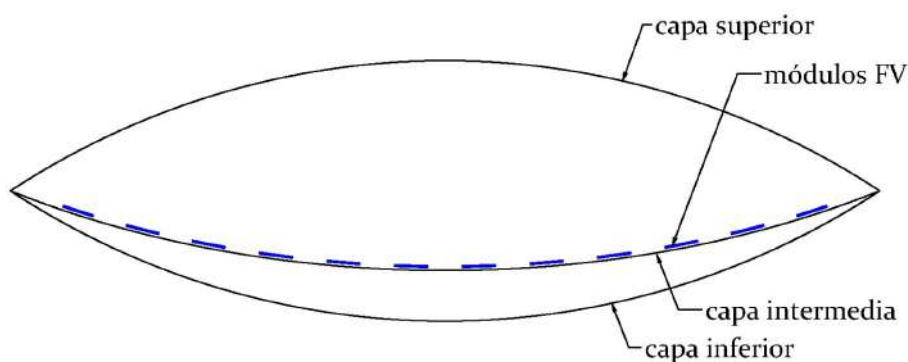
[Fig. 08] Módulos FV en la capa superior.

En contraste, el pabellón de Japón en la Expo de Shanghái incorporó los módulos en la cara interior de la capa inferior, lo que ofrece una mayor protección frente al exterior y una integración más limpia estéticamente. Sin embargo, carecía de un sistema específico para controlar posibles deformaciones o esfuerzos sobre los paneles.



[Fig. 09] Módulos FV en la capa inferior.

La solución más avanzada se encuentra en la cochera de AWM, donde los módulos de fotovoltaicos se colocan a la capa intermedia pretensada, evitando esfuerzos mecánicos y mejorando la durabilidad. Esta estrategia representa una integración más eficiente y equilibrada dentro de la arquitectura textil neumática.



[Fig. 10] Módulos FV en la capa intermedia.

### 1.3. En mallas de cables

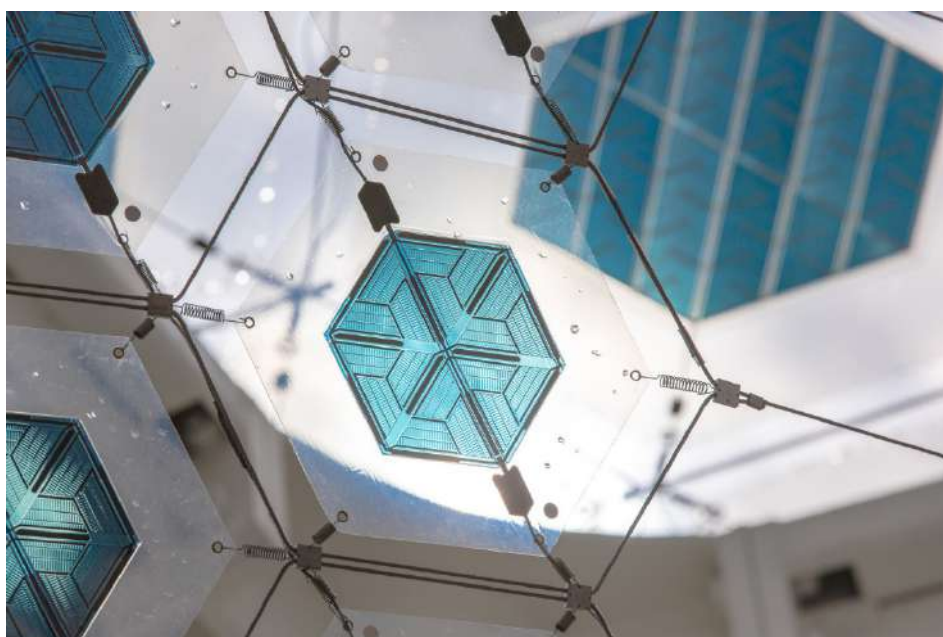
Las mallas de cables fueron la cuna de la arquitectura textil con Frei Otto. La integración de tecnología fotovoltaica en ellas tuvo su primer caso documentado en la Expo de Milán de 2015, donde Alemania presentó, como parte de su pabellón, unos “árboles solares”: unos elementos arquitectónicos en forma de plantas estilizadas, que emergían del suelo y se desplegaban como copas. Cada una de estas copas estaba cubierta por una malla de cables, hexagonal, de acero inoxidable sobre la que se integraron módulos fotovoltaicos orgánicos flexibles (OPV, *Organic Photovoltaic*). [9]

[Fig. 11] Árboles solares del pabellón de Alemania de la Expo de 2015, reubicados en Darmstadt.



Los módulos OPV, desarrollados por ASCA y Merck, se imprimieron directamente sobre unas láminas hexagonales de plástico PET, permitiendo una gran libertad de diseño y adaptación a superficies curvas. En el sustrato de PET se ubicaban seis perforaciones reforzadas en los vértices del hexágono, en las cuales se anclan unos resortes con gancho que están, a su vez, unidos a la malla.

[Fig. 12] Zoom de un módulo OPV.



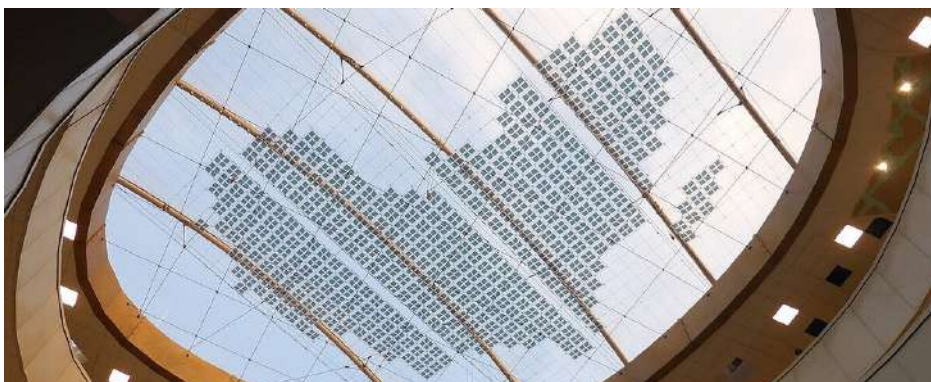
[9] Carl Stahl Architektur, «EXPO Milano 2015 - German Pavilion».

Estos módulos captaban la luz solar desde múltiples ángulos y funcionaban eficientemente incluso en condiciones de baja luminosidad. La energía generada durante el día se almacenaba en sistemas de baterías ubicados en la base de cada árbol, y se utilizaba para iluminar las copas mediante anillos de LED durante la noche, creando un ciclo energético autosuficiente. [7]

Este proyecto no solo demostró la viabilidad técnica de integrar tecnología solar en estructuras arquitectónicas ligeras y flexibles, sino que también ofreció una solución estética y funcional para la generación de energía en entornos urbanos. Tras la Expo, algunos de estos árboles solares fueron reubicados en el centro de innovación de Merck en Darmstadt, Alemania, donde siguieron operando en un entorno urbano más exigente desde el punto de vista climático, prolongando así su vida útil y promoviendo la reutilización de infraestructuras efímeras en nuevos contextos.

Un año más tarde se inauguró el edificio de Paz y Seguridad de la Unión Africana, en Adís Abeba (2016), el cual cuenta con un gran espacio central abierto cubierto por una singular “velo fotovoltaico”, sostenida por una malla ortogonal de cables, que se ha convertido en el punto focal del conjunto.

La estructura fotovoltaica, en forma del continente africano —símbolo también del organismo—, está compuesta por 445 módulos orgánicos fotovoltaicos (OPV) de color azul translúcido, distribuidos sobre una superficie de unos 25 × 20 metros. Los módulos están fijados a una malla de cables de acero inoxidable que se extiende bajo una cúpula de cojines de ETFE. Gracias a la semitransparencia de los módulos (alrededor de un 75% de transmisión de luz), el sistema proporciona sombra sin oscurecer por completo el espacio interior. La energía generada por estos módulos OPV flexibles es suficiente para abastecer toda la iluminación interior del edificio. [10]



[7] Q. Li y A. Zanelli, «A review on fabrication and applications of textile envelope integrated flexible photovoltaic systems».

[10] A. Monteleone, G. Rodonò, A. Gagliano, and V. Sapienza, «SLICE - Solar Lightweight Intelligent Component for Envelopes».

[Fig. 13] Atrio del edificio de Paz y Seguridad de la Unión Africana.

Gracias a la ligereza de la estructura en general, la instalación fue especialmente rápida: se completó en tan solo cinco días, sin necesidad de andamiaje ni maquinaria pesada, y mayoritariamente con mano de obra local.

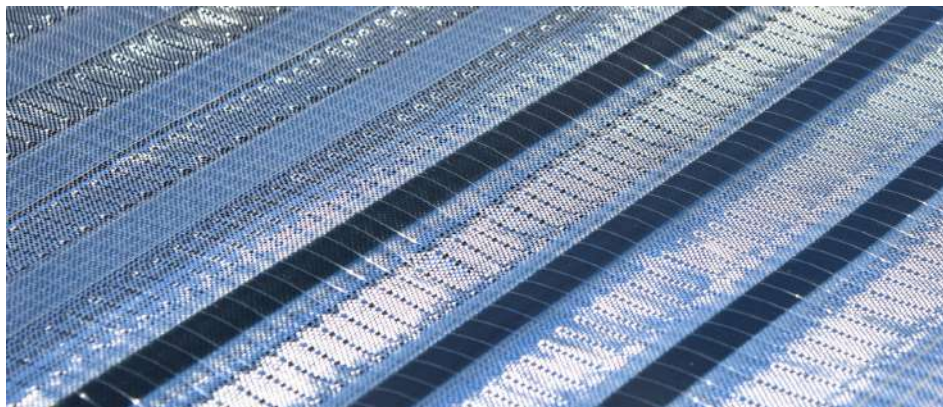
Los dos proyectos expuestos en esta categoría demuestran las enormes posibilidades del uso combinado de tecnologías solares flexibles y estructuras ligeras de cables, tanto en términos estéticos y de diseño como de sostenibilidad y facilidad de montaje.

#### 1.4. En el propio tejido

También es posible integrar la tecnología fotovoltaica en el propio textil, y, aunque no hay ninguna obra de arquitectura textil construida con esta innovación, existen estudios y prototipos de textiles que pueden utilizarse en un futuro en este campo.

*Suntex* es un material textil actualmente en desarrollo por el estudio Pauline van Dongen [11], especialistas en tejidos y ropa inteligente. Mediante la integración de láminas orgánicas fotovoltaicas (OPV) en un tejido, nace un material ligero con potencial de ser utilizado en el mundo de la arquitectura tensada, permitiendo la generación de energía solar sin renunciar a la flexibilidad, ligereza y expresividad de las estructuras textiles.

[Fig. 14] Detalle del tejido fotovoltaico *Suntex*.



Este innovador tejido fue propuesto como parte de la envolvente del pabellón neerlandés para la Expo de Osaka 2025, en una propuesta desarrollada por el estudio Overtreders W [12], bajo el lema *Let's Turn Things Around*. Aunque el proyecto no resultó ganador, obtuvo el segundo lugar en la convocatoria y destacó por presentar una visión urbana sostenible y optimista, basada en materiales circulares y estrategias participativas.

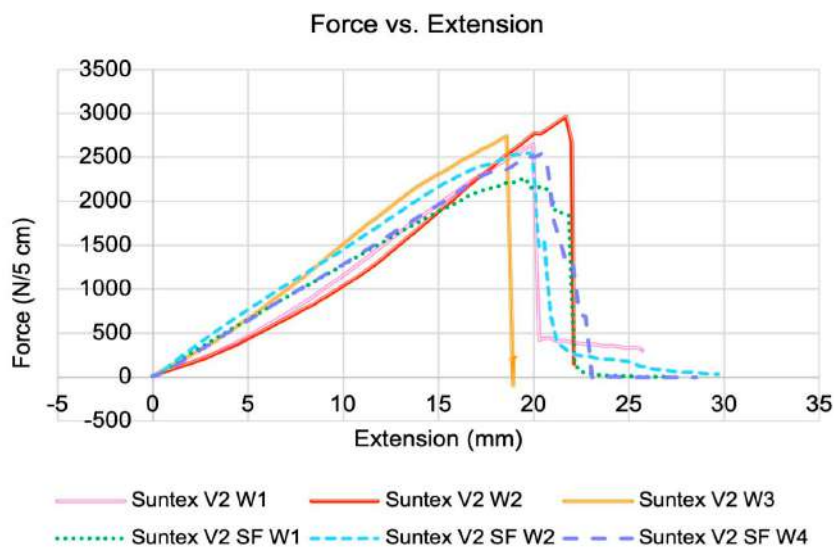
[11] «SUNTEX - Pauline van Dongen»

[12] «Osaka | Overtreders W | Architectural design»

Para la producción de este material se seleccionaron los módulos orgánicos de ASCA, junto con los que se utilizan hilos conductores (para conectar eléctricamente los módulos), monofilamentos transparentes (para fijar las láminas sin sombreados ni esfuerzos) e hilos de alta tenacidad que proporcionan la resistencia estructural necesaria. En el diseño del tejido se desarrolló un patrón que distribuye las cargas mecánicas en los hilos de alta tenacidad, mientras que los hilos que no reciben cargas fijan las láminas OPV sin generar tensiones. [13]

En cuanto a la evaluación experimental, se realizaron ensayos de tracción en muestras de tejido (de al menos 5 cm de ancho y 20 cm de largo), montadas en una máquina de ensayo y sometidas a tracción hasta rotura. A partir de estas pruebas, la carga límite y el alargamiento se midieron para evaluar la resistencia y la rigidez de las muestras. Se llevaron a cabo múltiples series de pruebas en tejidos compuestos con diferentes resistencias de hilo para examinar si la resistencia de la configuración cumple con el objetivo. [13]

Los resultados, reflejados en una gráfica de tensión-deformación, mostraron cargas límite de 2.781,4 N/5cm en las muestras sin lámina OPV y de 2.545,2 N/5cm en las que sí la incluían, lo que representa una reducción de solo el 8 %, confirmando la eficacia de la estrategia de integración de la OPV. [13]



[Fig. 15] Gráfica tensión-deformación de los ensayos de Suntex.

Cabe destacar que se observó una tensión menor en las secciones de la película solar en comparación con las secciones tejidas adyacentes, lo que implica que las células solares no estarían bajo ninguna tensión que pueda causar una pérdida de función antes de que falle la tela. Esto indica que la estrategia de diseño del tejido para integrar la película solar de manera que no esté sujeta a grandes cargas de tracción es exitosa y respalda la viabilidad de este enfoque y del tejido en sí. [13]

[13] P. Van Dongen, E. Britton, A. Wetzel, R. Houtman, A. M. Ahmed, y S. Ramos, «Suntext: Weaving Solar Energy into Building Skin».

Sin embargo, los resultados se limitan únicamente a la dirección de la urdimbre, ya que las muestras se ensayaron uniaxialmente, y, debido a que las muestras se tejieron a mano, es probable que se produzca una tensión no uniforme, que podría causar fallas con una carga menor de lo que es potencialmente posible. No obstante, estos resultados muestran que el *Suntex* es una tecnología prometedora para lograr un tejido capaz de incorporarse a la industria de la arquitectura textil.

### 1.5. Exploración de soluciones emergentes

Más allá de las soluciones comerciales actualmente disponibles, el campo de la arquitectura textil fotovoltaica se encuentra en plena expansión. Aunque muchas de estas tecnologías aún se encuentran en fase de investigación o prototipado, ofrecen un enorme potencial para transformar la forma en que se conciben y construyen las envolventes arquitectónicas.

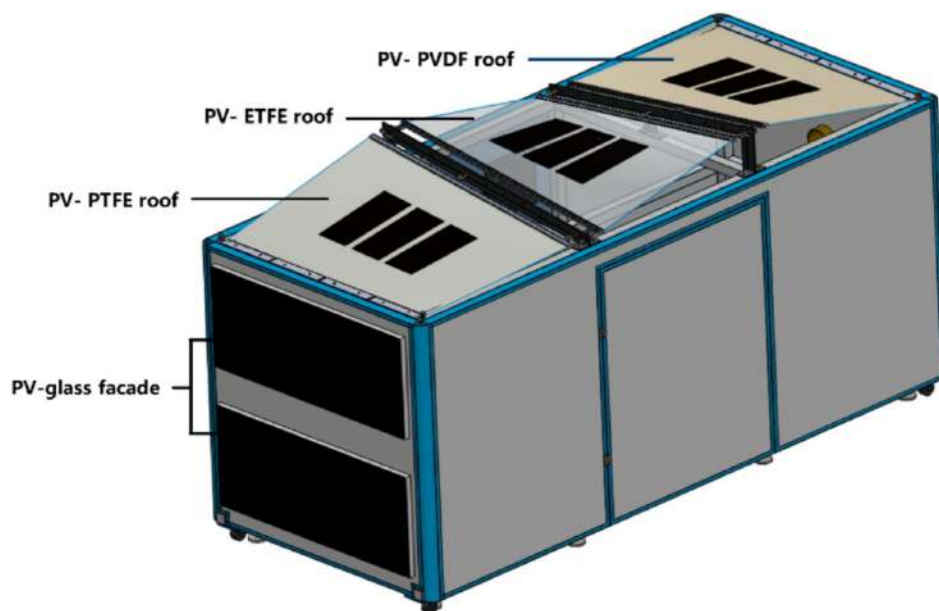
La tecnología de células solares de perovskita destaca por su alta eficiencia, potencial y sencillez de su proceso de fabricación. Estas células fotovoltaicas, rápidas de fabricar y con bajos costes de producción, pueden llegar a ser ligeras, flexibles y semitransparentes. Sin embargo, tienen limitaciones en varios aspectos como en su estabilidad, ya que se degradan con facilidad en ambientes húmedos, a la exposición de radiación UV y por calentamiento [14]. Actualmente se está investigando cómo mejorar las características de esta tecnología que, si supera esos inconvenientes, podría convertirse en una buena candidata para integrarse en la arquitectura textil.

[14] «¿Qué es una célula solar de perovskita? | Máster de energía solar fotovoltaica».

[15] R. Scotta, M. Lazari, E. Stecca, R. Di Massimo, y R. Vitaliani, «Membranes with embedded photovoltaic flexible cells: Structural and electrical performances under uniaxial and biaxial stresses».

Por otra parte, en el campo de la arquitectura textil fotovoltaica, un estudio de la Universidad de Padua [15] exploró la integración de células solares flexibles en membranas textiles, encapsulándolas bajo láminas de ETFE para su protección, y analizó el comportamiento estructural del conjunto resultante. Los ensayos uniaxiales y biaxiales demostraron que estas membranas con células fotovoltaicas integradas pueden soportar las deformaciones típicas de servicio de las estructuras tensadas sin comprometer su producción eléctrica: ésta se mantiene estable bajo pruebas de tracción, hasta una tensión de 20 N/mm<sup>2</sup>. Cabe destacar que, aunque a priori esto demuestra la viabilidad estructural de la integración directa de módulos flexibles en textil, en la misma investigación se aclara que es necesario realizar más ensayos bajo otras condiciones para validar completamente los resultados obtenidos.

Más recientemente, un estudio de la Universidad Jiao Tong de Shanghai [16], publicado en 2025, reportó el desarrollo de membranas tensadas con células delgadas de silicio monocristalino encapsuladas en membranas de ETFE, PTFE (politetrafluoroetileno) y PVDF (fluoruro de polivinilideno), evaluándose tanto su rendimiento energético a largo plazo como su respuesta mecánica bajo carga. En los ensayos a tracción uniaxial se observó que antes de que las membranas alcanzasen el límite elástico, las células fotovoltaicas no se fracturaban y continuaban funcionando con normalidad. Además, se realizó un ensayo a largo plazo, mediante el prototipado de unas cubiertas textiles con dichas células delgadas integradas. Tras un año de pruebas, se demostró un desempeño fotovoltaico estable, y se observó que la tensión propia de las membranas no comprometía la integridad ni la eficiencia de las células de silicio encapsuladas.



[Fig. 16] Prototipo de ensayo con cubiertas de membrana fotovoltaica.

Estos avances emergentes, aún en fase experimental pero cada vez más cercanos a su aplicación real, revelan el enorme potencial de la arquitectura textil como soporte activo de tecnologías energéticas. En este cruce entre materia, técnica y energía se encuentra uno de los caminos más prometedores hacia una arquitectura más sostenible.

[16] Y. Yan, W. Chen, J. Hu, y I. Tariq, «Long-term testing study of tensile ETFE, PTFE and PVDF membrane structure integrated thin Si-PV».



MADRID - PUERTA DEL SOL



## 2. METODOLOGÍA

Este trabajo se estructura en torno al desarrollo de dos propuestas de integración fotovoltaica en sistemas textiles ligeros, aplicadas al espacio público de la Puerta del Sol en Madrid. A través de un enfoque técnico y aplicado, se analizan soluciones que combinan estrategias de sombreado pasivo con generación activa de energía solar, adaptadas a las particularidades climáticas, formales y de uso de este entorno urbano.

La elección de la Puerta del Sol como caso de estudio responde a su condición emblemática dentro del tejido urbano madrileño, así como a las deficiencias bioclimáticas que presenta. La escasez de sombra, la ausencia de vegetación y el uso extensivo de materiales de alta inercia térmica —como el granito— generan, especialmente en la zona estancial, condiciones de incomodidad térmica acentuadas durante los meses cálidos [17]. Ante esta situación, se plantean soluciones de cubierta textil que mitiguen el impacto del soleamiento y activen energéticamente el espacio mediante la incorporación de sistemas fotovoltaicos.

Para ello, se desarrollan y analizan dos propuestas de integración fotovoltaica, utilizando para ello como módulos fotovoltaicos comerciales, con la doble finalidad de proponer soluciones cercanas al mercado, y de costes competitivos. La primera solución se enmarca en la tipología de sistemas tensados con integración en la propia membrana, y consiste en una estructura de membrana textil, en cuya superficie se disponen bolsillos de ETFE termosoldados que alojan módulos fotovoltaicos sin vidrio ligeros, permitiendo así una integración directa y continua sobre el plano de sombra. La segunda propuesta responde a la tipología de estructuras de mallas de cables, en las que los módulos fotovoltaicos, en este caso vidrios fotovoltaicos, se fijan sobre la red estructural, generando un plano de cobertura más rígido y fragmentado, pero igualmente funcional desde el punto de vista energético y formal.

[17] Dirección General del Espacio Público y Cota Cero Estudios Urbanos y Territoriales SLP, «PLAN DE ACTUACIONES DE LA PUERTA DEL SOL».

Para su desarrollo se emplea una metodología combinada que integra herramientas digitales de análisis solar, diseño 3D, renderizado, patronaje, cálculo energético y estimación económica.

El estudio del soleamiento, desde el punto de vista pasivo y vinculado a las condiciones de bienestar termohigrométrico, se aborda mediante el uso del simulador web Shadowmap, que permite analizar la evolución de las sombras en el emplazamiento durante distintos momentos

del año y del día. Estos datos permiten estimar la eficacia de cada propuesta en términos de reducción de la radiación incidente sobre la zona estancial.

El diseño tridimensional se lleva a cabo con Rhinoceros 3D, mientras que la geometría específica de la membrana tensada se genera con el software MPanel, que permite definir superficies en equilibrio bajo tracción. Para el renderizado de los modelos se utiliza la herramienta Twinmotion.

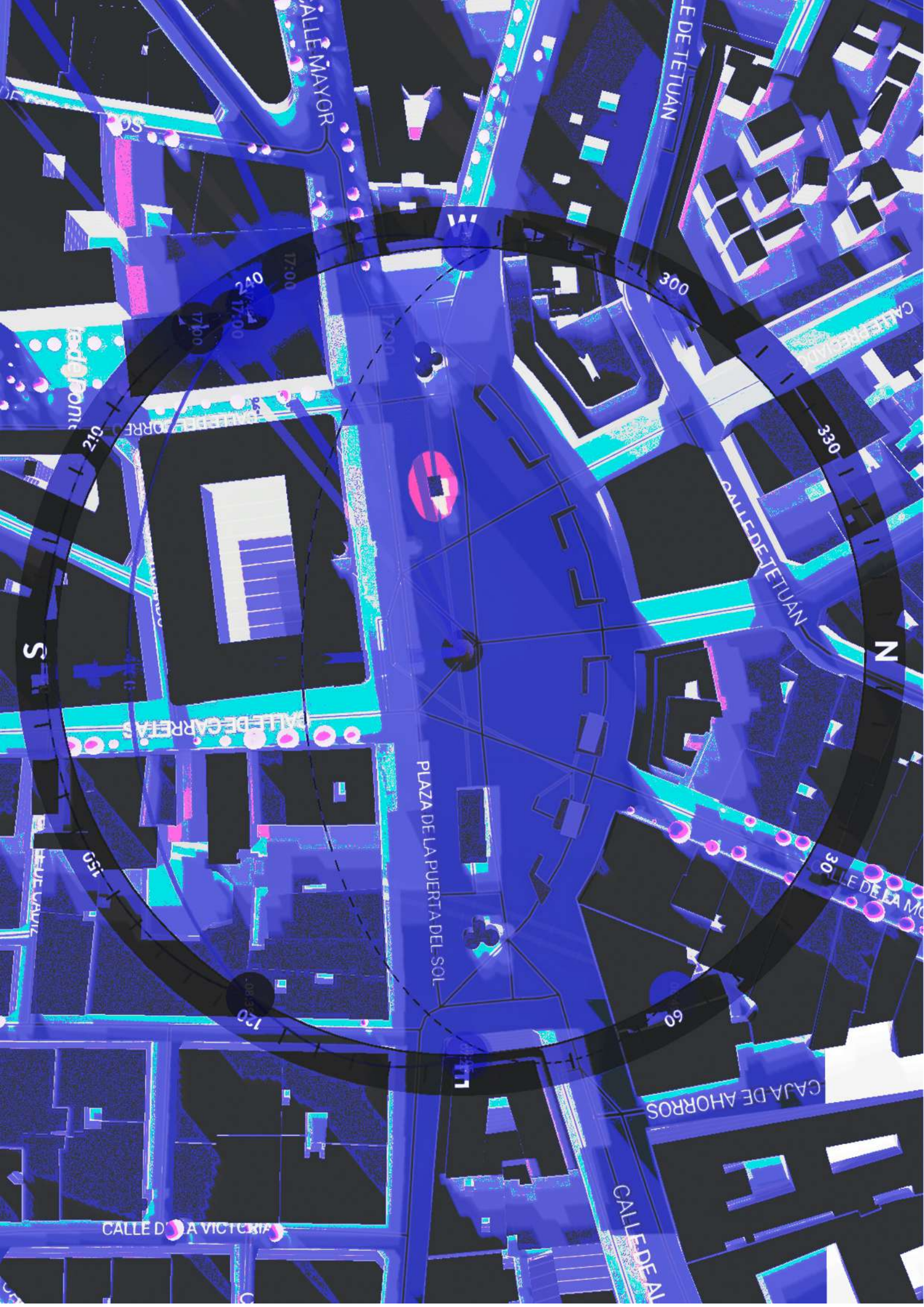
La producción eléctrica de cada sistema se calcula con la herramienta web Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) [18], considerando la orientación e inclinación de los módulos, las pérdidas del sistema y las condiciones atmosféricas locales. PVGIS es una aplicación web desarrollada por el Joint Research Centre de la Comisión Europea que permite obtener datos sobre el recurso solar y la producción de energía eléctrica de sistemas fotovoltaicos ubicados en lugares de la mayor parte del mundo. [19]

Esta metodología permite no solo comprobar la viabilidad técnica de cada intervención, sino también explorar su impacto potencial como estrategia climática aplicada al espacio público. De este modo, el trabajo se sitúa en la intersección entre arquitectura, energía y confort urbano.

[18] «JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission».

[19] «PVGIS data sources & calculation methods - European Commission».





CALLE MAYOR

LE DE TETUAN

300

CALLE DE TETUAN

330

CALLE DE TETUAN

N

PLAZA DE LA PUERTA DEL SOL

CALLE DE LA MO

30

CAJA DE AHORROS

CALLE DE LA

CALLE DE LA VICTORIA

S

120

60

210

17:00

04:17:00

17:00

### 3. ANÁLISIS DE SOLEAMIENTO DE LA PUERTA DEL SOL

Este capítulo se dedica al análisis solar de un espacio urbano donde la exposición solar prolongada genera condiciones de incomodidad térmica durante buena parte del año. Se busca cuantificar la magnitud del problema y establecer una base climática sólida sobre la que, más adelante, se plantearán dos propuestas específicas de intervención adaptadas a las particularidades del lugar.

Se ha elegido como caso de estudio la Puerta del Sol, uno de los espacios públicos más emblemáticos y transitados de Madrid, donde la ausencia de sombra y la acumulación de calor han generado históricamente situaciones de incomodidad térmica. Prueba de ello es que, en el pasado, los bajos comerciales contaban con toldos permanentes en las fachadas orientadas al sur, una solución hoy desaparecida. En este contexto, el estudio del soleamiento permite identificar las áreas y periodos de mayor exposición solar, así como establecer criterios técnicos para diseñar soluciones arquitectónicas activas que respondan de forma eficaz al problema detectado.

[Fig. 17] Tarjeta postal “Calle de Preciados y Puerta del Sol”, 1915.



Para ello, se ha realizado un estudio centrado en la evolución de las sombras proyectadas por los edificios el día 21 de cuatro meses representativos —diciembre, marzo, junio y septiembre—, a las 13:00 y/o 14:00 horas, y a las 16:00 horas. Estas franjas horarias permiten observar tanto la incidencia solar en torno al mediodía, cuando el sol alcanza su posición elevada en el cielo, como en una de las horas de la tarde donde se suelen dar los picos de temperatura.



Azimut:  $176,8^\circ$

Elevación:  $26,1^\circ$

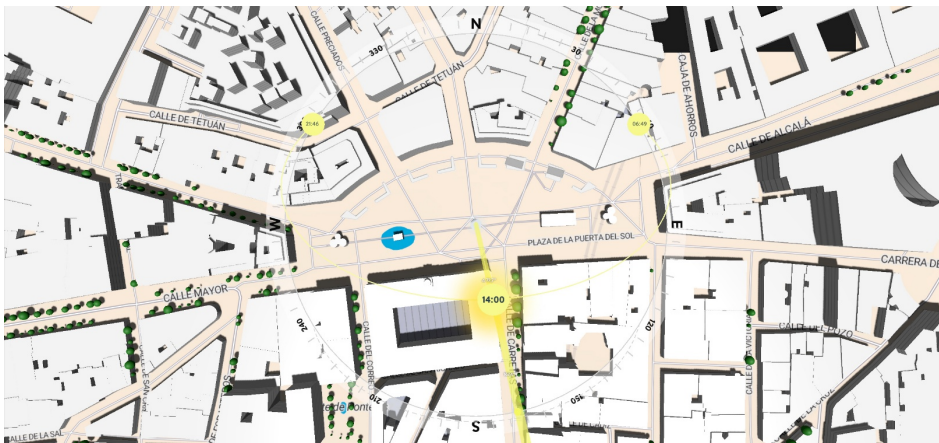
[Fig. 18] Soleamiento 21 de diciembre, 13:00 h



Azimut:  $171,6^\circ$

Elevación:  $49,6^\circ$

[Fig. 19] Soleamiento 21 de marzo, 13:00 h



Azimut:  $130,9^\circ$

Elevación:  $66,7^\circ$

[Fig. 20] Soleamiento 21 de junio, 14:00 h



Azimut:  $154,6^\circ$

Elevación:  $47,4^\circ$

[Fig. 21] Soleamiento 21 de septiembre, 14:00 h

Azimut:  $230,6^\circ$

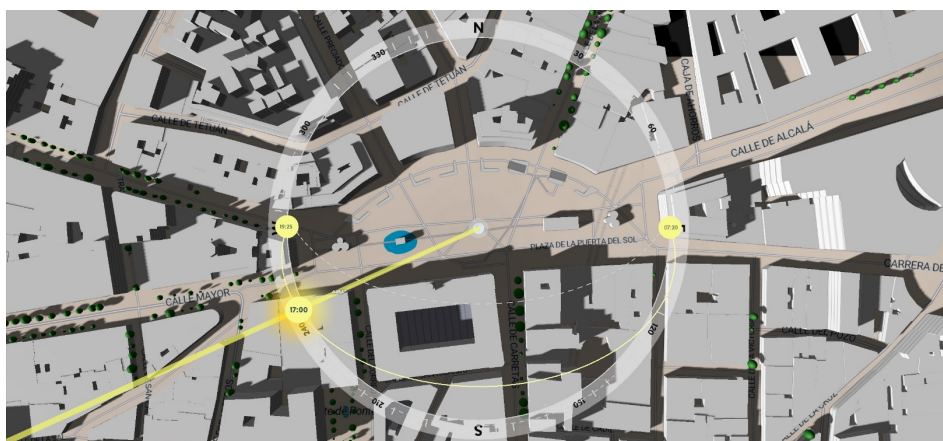
Elevación:  $7,2^\circ$



[Fig. 22] Soleamiento 21 de diciembre, 17:00 h

Azimut:  $245,4^\circ$

Elevación:  $26,4^\circ$



[Fig. 23] Soleamiento 21 de marzo, 17:00 h

Azimut:  $251,3^\circ$

Elevación:  $50,9^\circ$



[Fig. 24] Soleamiento 21 de junio, 17:00 h

Azimut:  $235,6^\circ$

Elevación:  $34,3^\circ$



[Fig. 25] Soleamiento 21 de septiembre, 17:00 h

El análisis de las imágenes generadas permite observar con claridad cómo varía la incidencia solar en la Puerta del Sol a lo largo del año y del día.

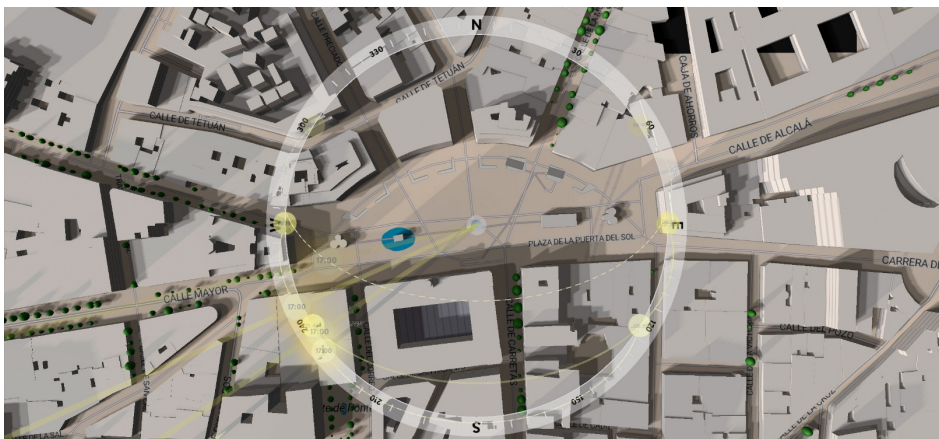
A las 12:00 h (Fig. 14 a Fig. 17), la elevación solar varía desde  $23,9^\circ$  en diciembre hasta  $56,7^\circ$  en junio, reduciendo notablemente las sombras en los meses cálidos. El azimut también cambia, con el sol más al sur en invierno y desplazado hacia el este en verano, lo que modifica la dirección de las sombras.

A las 16:00 h (Fig. 18 a Fig. 21), el sol avanza hacia el oeste (azimut entre  $219^\circ$  y  $240^\circ$ ), proyectando sombras más alargadas hacia el este y favoreciendo la acumulación térmica. Estos datos permiten identificar con claridad las zonas más expuestas, base sobre la que se plantearán las futuras intervenciones.

A partir de las imágenes anteriores, se han generado dos composiciones superpuestas —una para las 12:00 h y otra para las 16:00 h— que permiten visualizar de forma conjunta las sombras proyectadas en las distintas estaciones del año. Esta síntesis gráfica facilita la identificación de aquellas áreas que permanecen expuestas al sol de manera constante, lo que resulta fundamental para determinar con mayor precisión las zonas prioritarias de intervención.



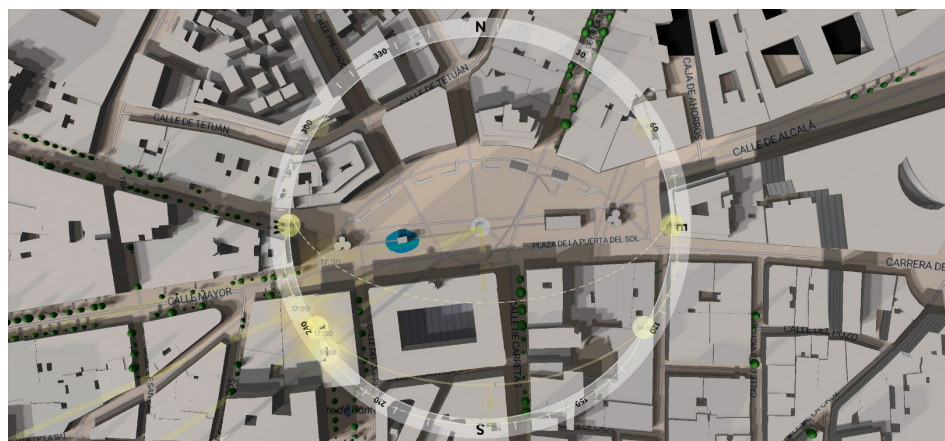
[Fig. 26] Superposición, DIC-MAR-JUN-SEP  
13:00 y 14:00 h



[Fig. 27] Superposición, DIC-MAR-JUN-SEP  
17:00 h

Para completar el estudio, se ha realizado una superposición de todas las imágenes de soleamiento generadas, correspondiente a los diferentes meses y franjas horarias. Esta composición permite visualizar de forma conjunta las zonas de sombra y de exposición solar constante a lo largo del año. El resultado pone de manifiesto que la zona estancial —el arco de la plaza—, donde se ubican los bancos, no recibe sombra en ningún momento a lo largo del año, lo que justifica su selección como el lugar más adecuado para implantar soluciones de sombreado activas.

[Fig. 28] Superposición,  
DIC-MAR-JUN-SEP  
12:00 y 16:00 h

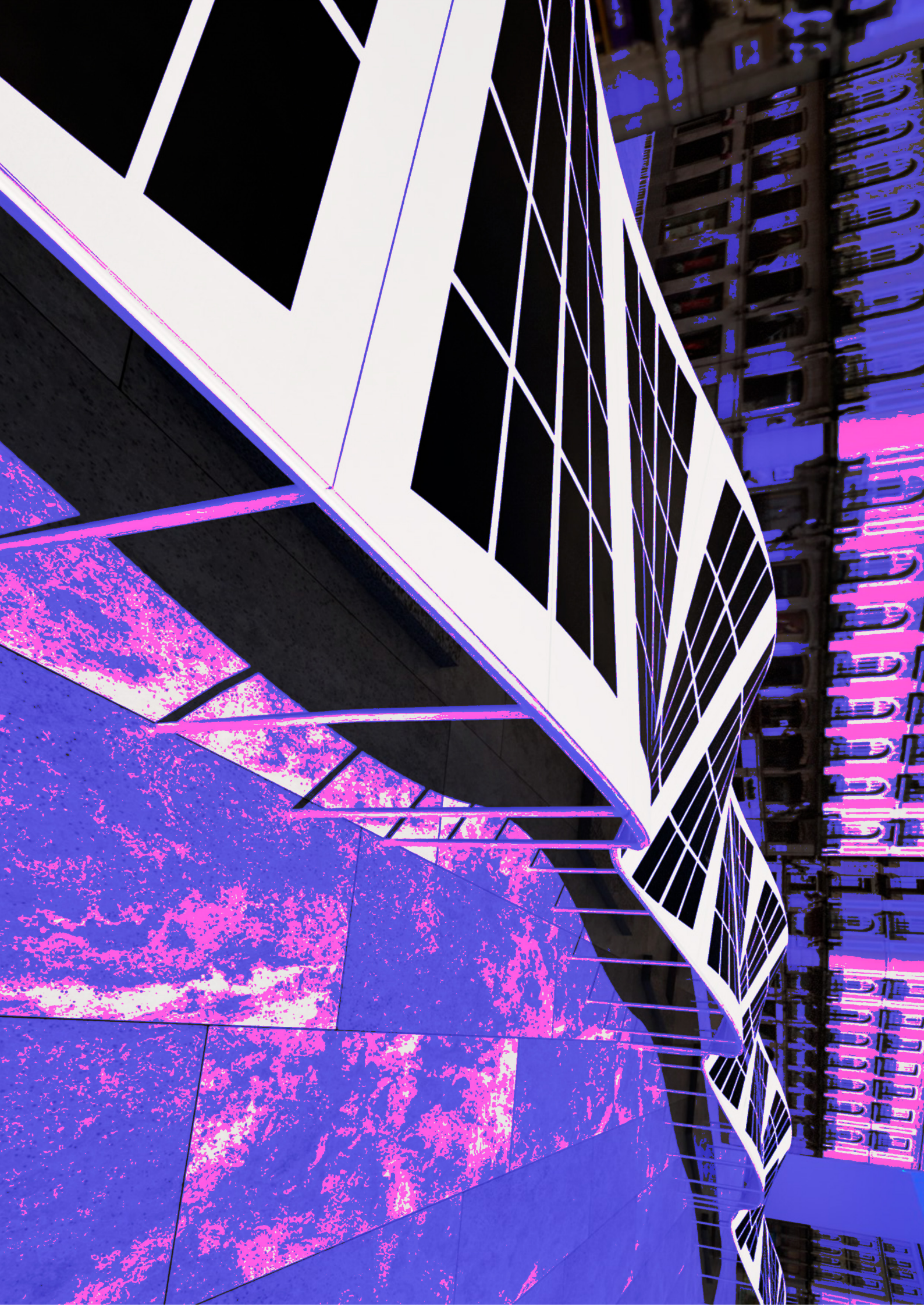


En respuesta a la falta de sombra en la nueva Puerta del Sol, el Ayuntamiento de Madrid impulsó en 2024 —comenzando su construcción en 2025—, la instalación de toldos textiles desmontables sobre los bancos del arco norte de la plaza [20]. Esta actuación, de carácter estacional y limitada en escala, busca mejorar el confort térmico del espacio público sin alterar de forma permanente su configuración patrimonial. La existencia de este proyecto pone de manifiesto la necesidad real de intervención climática en la plaza y refuerza el enfoque de este trabajo, que propone soluciones de sombreado más amplias, integradas y con valor añadido mediante la generación de energía fotovoltaica.

[Fig. 29] Render del  
proyecto del Ayunta-  
miento de Madrid.



[20] «Plataforma de  
Contratación del Sector  
Público».

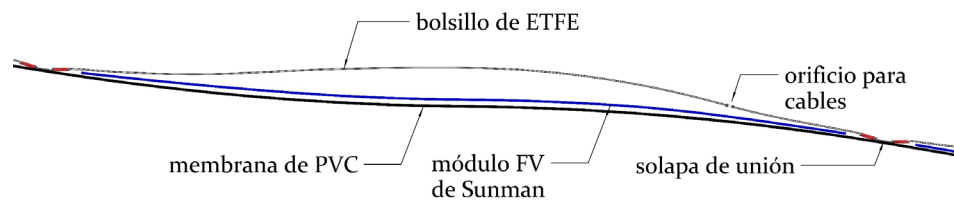


## 4. PROPUESTA 1: INTEGRACIÓN SOBRE MEMBRANA

La primera propuesta de intervención consiste en una estructura de membrana textil tensada que integra módulos fotovoltaicos ligeros en su superficie.

Para ello, se plantea el uso de un sistema de bolsillos de láminas de ETFE, transparente, unidos a la membrana principal de PVC (Policloruro de vinilo), en cuyo interior se insertan módulos comerciales flexibles; para esta propuesta se eligen los desarrollados por el fabricante Sunman<sup>®</sup> [21]. Esta solución busca combinar la ligereza y adaptabilidad de la arquitectura textil con la eficiencia energética de tecnologías fotovoltaicas consolidadas, dando lugar a una cubierta que proporcione sombra y reduzca la radiación incidente en la zona estancial de la Puerta del Sol, al tiempo que genera electricidad.

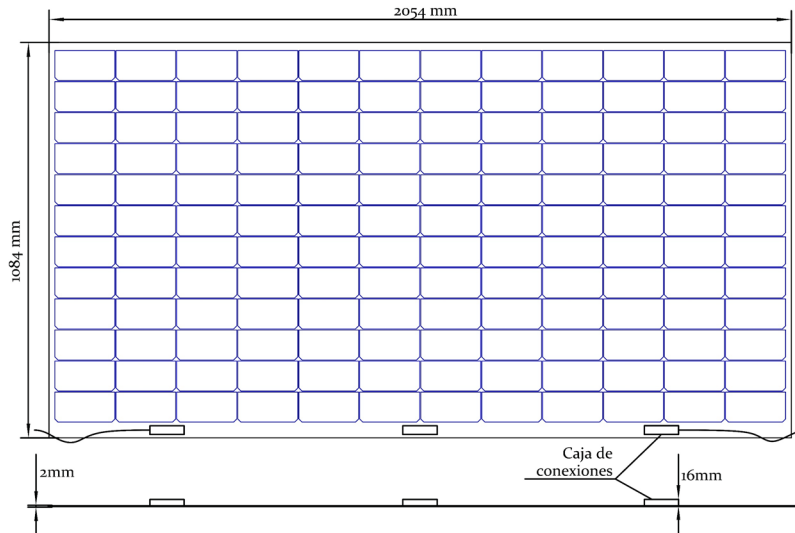
[Fig. 30] Esquema de la integración de un módulo de Sunman.



Los módulos *eArc* de Sunman<sup>®</sup> se caracterizan por su ligereza —con un peso propio de  $2,8 \text{ kg/m}^2$ —, su escaso espesor de apenas 2mm y su flexibilidad para adaptarse a geometrías con cierta curvatura [21]. Esta pionera tecnología permite su instalación en múltiples estructuras, adaptándose a su geometría, sin prácticamente exigir una consideración estructural relevante. Además, estos módulos fotovoltaicos, a pesar de ser flexibles y sin vidrio, cumplen con los mismos estándares de calidad que los módulos fotovoltaicos convencionales, en particular las normas IEC 61215 e IEC 61730, que aseguran una alta calidad constructiva y seguridad eléctrica. Son los únicos módulos flexibles que se han encontrado con estas características, ofreciendo una garantía de producto de 12 años y una garantía de producción de 25 años.

Para este caso de estudio se ha seleccionado el modelo SMF430F-12X12UW, con una potencia de 430 W en Condiciones Estándar de Medida, por ofrecer un equilibrio óptimo entre densidad de potencia ( $194 \text{ W/m}^2$ ), dimensiones suficientemente amplias para reducir el número de elementos para una gran superficie, pero aun manejable para facilitar la instalación, alta durabilidad y un coste competitivo.

[21] SUNMAN, «Sunman / Pioneer of Ultra-Light Solar».

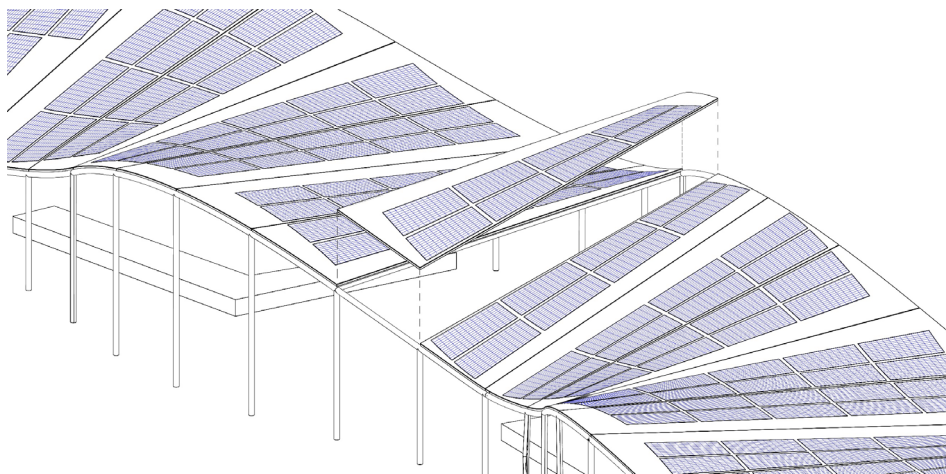


[Fig. 31] Planta y perfil del módulo 430W SMF430F-12X12UW, de Sunman.

#### 4.1. Diseño formal y estructural

La estructura portante de las membranas adopta una geometría on-deante que responde a la voluntad de crear una superficie visualmente ligera y dinámica, que dialogue con el carácter abierto y cambiante del espacio público. Esta forma no solo aporta un valor estético diferenciador, sino que, además, las curvaturas favorecen una orientación variable de los módulos fotovoltaicos, optimizando la captación solar a lo largo del día sin necesidad de sistemas móviles, así como permiten una evacuación controlada del agua pluvial.

Para garantizar la versatilidad del espacio y su adaptación a distintos usos, especialmente durante eventos donde se requiere una mayor visibilidad o apertura —como las Campanadas de Fin de Año—, las membranas se instalan sobre bastidores desmontables, de modo que cada bastidor sostiene un tramo de la membrana tensada y puede retirarse de forma independiente sin afectar al conjunto estructural. Este sistema modular permite una instalación flexible, facilitando tanto el mantenimiento como la reconfiguración temporal del sombreado según las necesidades del momento.



[Fig. 32] Axonometría de un bastidor explotado.

Dado que el objetivo principal de este trabajo no es el cálculo estructural exhaustivo, sino el desarrollo constructivo y sostenible de soluciones de integración fotovoltaica, el dimensionado de la estructura se ha realizado de forma aproximada, basándose en proporciones y escalas coherentes. Los elementos portantes han sido modelados con secciones y luces razonables que permiten su viabilidad técnica, pero sin profundizar en un análisis estructural completo, que quedaría fuera del alcance de este proyecto.

En este planteamiento, tanto los pilares como las vigas principales se resuelven mediante perfiles de sección circular de 30 cm de diámetro, con luces entre las vigas que oscilan entre los 9,5 y los 12 metros. Sobre esta estructura se disponen viguetas secundarias dispuestas de forma radial, también de sección redonda, con un diámetro de 20 cm y luces de entre 3 y 4,5 metros, conformando así una subestructura ligera y continua que permite tensar adecuadamente la membrana. Los pilares, de 20 cm de diámetro, se colocan bajo cada punto de entrega de las viguetas a las vigas principales, asegurando una correcta transferencia de cargas y una mayor estabilidad del conjunto.

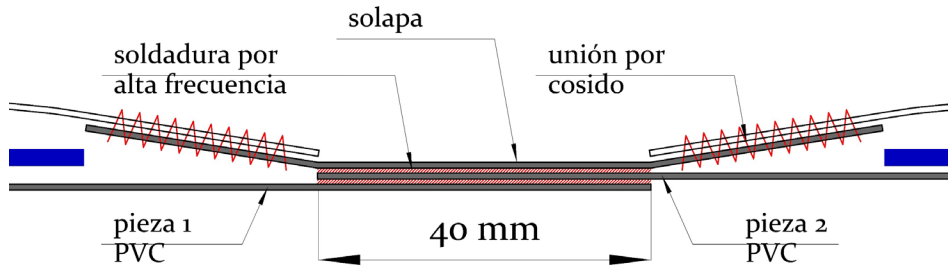
#### 4.2. Integración, patronaje y configuración

El patronaje de las membranas de cada bastidor está condicionado al tamaño de los módulos fotovoltaicos elegidos. Suponiendo una integración del máximo número posible de módulos FV en cada bastidor, con una separación entre éstos de 10 cm, las uniones y dirección de los patrones deben coincidir con los espacios libres entre los elementos solares. Así, se podrá soldar, a su vez, la unión entre la membrana y la capa de ETFE, para crear los bolsillos que alojan los paneles.

Respecto a los bolsillos, a priori existe un obstáculo en el encuentro entre la membrana principal y el ETFE transparente, dado que no es posible unir directamente ésta última lámina a la inferior de PVC: si se cosiera directamente el ETFE a la membrana de PVC podrían surgir problemas de filtraciones de agua a través de la costura; y tampoco es posible la unión entre las dos capas mediante fusión, ya que las membranas de PVC se sueldan por alta frecuencia mediante un electrodo [22], y el ETFE por temperatura, por lo que no se pueden mezclar las dos láminas al utilizar sistemas diferentes. Por ende, como solución, las uniones de los bolsillos de ETFE al textil de PVC se realizan mediante un sistema de solapas de PVC: la parte central de éstas se suelda a la membrana principal, haciendo coincidir dicha soldadura con las soldaduras entre los patrones de la membrana principal; y, a su vez, se une, mediante cosido, la lámina de ETFE a las solapas, ya soldadas,

[22] Forsstrom High Frequency AB, «¿Qué es la soldadura por HF?».

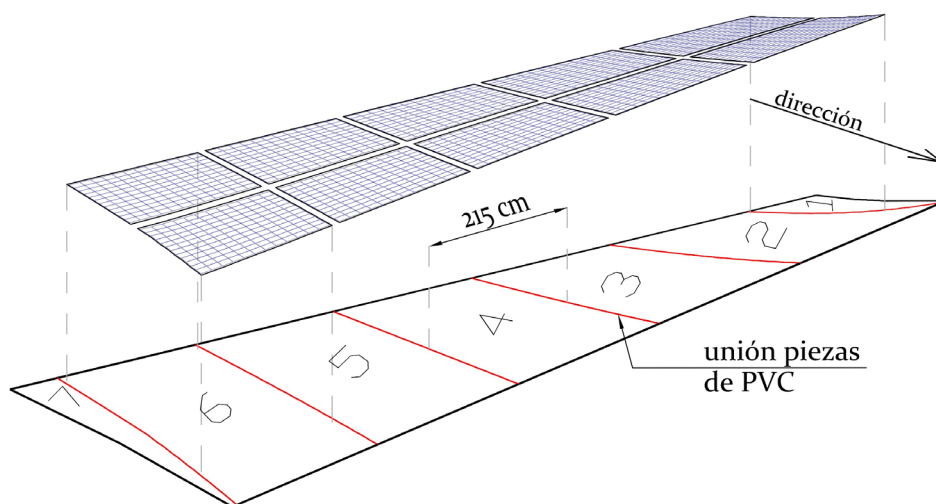
quedando el bolsillo transparente por encima de la solapa evitando, así, filtraciones de agua al interior del bolsillo de ETFE. Este sistema, al no precisar de soldadura mediante calor, no se ve comprometido por las temperaturas que pueda alcanzar el módulo solar mientras esté operativo.



[Fig. 33] Detalle de la unión de los bolsillos de ETFE.

Cada bolsillo aloja en su interior dos módulos de Sunman y está unido a la membrana principal por tres de sus cuatro bordes, para, así, poder insertar los paneles por el borde libre. El hecho de que quede abierto uno de los lados no solo permite la inserción del módulo, sino que además facilita cierta ventilación del bolsillo, lo que favorece la disipación térmica del generador fotovoltaico y, por tanto, mejora su rendimiento energético. (ver Fig. 35)

Es necesario un patronaje de las membranas, ya que la forma final de cada una de éstas tiene curvatura y no se puede ejecutar de una sola pieza de membrana plana. Como se ha mencionado anteriormente, los bordes de los patrones irán entre los módulos fotovoltaicos. De esta manera, dado que el módulo de Sunman seleccionado mide 205,4 cm, y dejando una separación entre ellos de 10 cm, el ancho del patrón será de 215,4 cm.

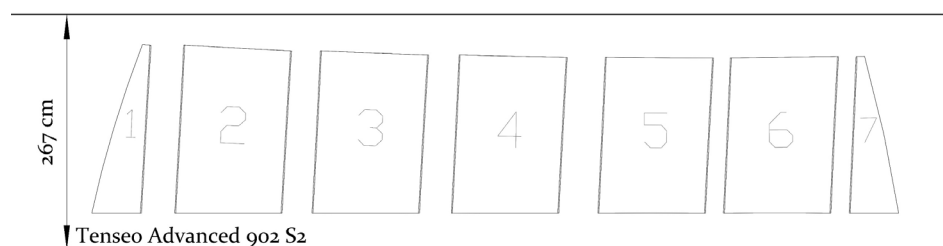


[Fig. 34] Esquema en axonometría de las condiciones del patronaje.

El ancho del patrón está también condicionado por el ancho del rollo de la membrana que se elija; en este caso, una membrana de Serge

Ferrari<sup>®</sup>, modelo *Tenseo Advanced 902 S2*, que cuenta con un ancho de rollo de 267 cm [23], por lo que es suficiente para cortar las piezas de la membrana. Una vez establecido el ancho de los patrones y la dirección de éstos, se procede, mediante MPanel, a la generación de los mismos, añadiendo un extra de 2 cm en los bordes de unión, para poder ejecutar un solape de 4 cm para su posterior soldado. Cabe destacar que, aunque haya cierto desaprovechamiento del material, ya que no se ajusta al máximo el ancho del patrón al ancho de rollo, es la solución más práctica en este caso, ya que apenas existen rollos de otros fabricantes con un ancho inferior a 267 cm y tan cerca de los 215 cm.<sup>i</sup>

[Fig. 35] Patrones planos sobre el rollo elegido de Serge Ferrari.



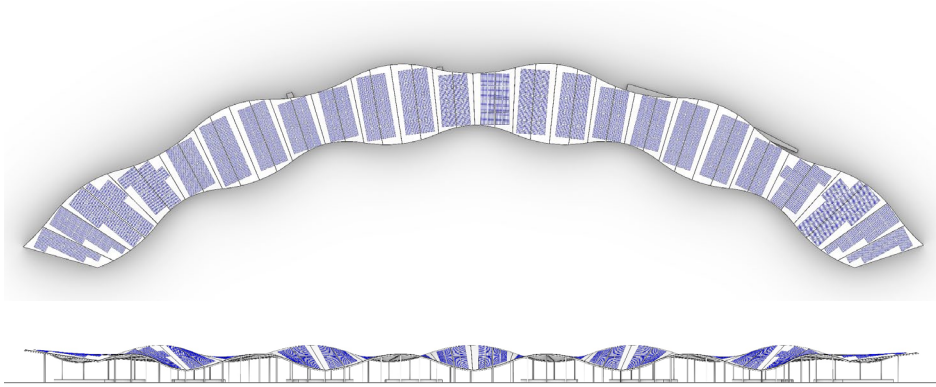
En cuanto a la membrana de PVC, se trata de un tejido composite con base de poliéster de alta tenacidad, recubierto con un barniz PVDF (fluoruro de polivinilideno), lo que le confiere resistencia a los rayos UV, facilidad de limpieza y una elevada durabilidad en exteriores. Además, el tratamiento superficial y el acabado anticapilar del hilo, «low wick treatment for anticapillarity» [23], impiden la penetración del agua a través del tejido, garantizando su impermeabilidad y estabilidad frente a la humedad. Por otro lado, su color blanco permite que funcione como difusor de luz natural, aportando una atmósfera luminosa bajo la cubierta durante el día. Esta combinación de prestaciones funcionales y cualidades visuales la convierte en una solución idónea para la integración con tecnología fotovoltaica ligera.

Aprovechando esta última característica como difusor de luz, se proponen tres posibles configuraciones de colocación de los módulos fotovoltaicos, cada una con un enfoque diferente en la prioridad otorgada a la producción energética, la transparencia visual o la expresividad formal.

La primera configuración maximiza la superficie cubierta con módulos fotovoltaicos, ocupando prácticamente toda la superficie disponible de la membrana tensada, priorizando la generación eléctrica y reduciendo al mínimo la transmisión de luz a través del tejido. Así, los módulos FV ocupan un 57% de la superficie total de las membranas —953 m<sup>2</sup> ocupados sobre 1678 m<sup>2</sup> de membrana—.

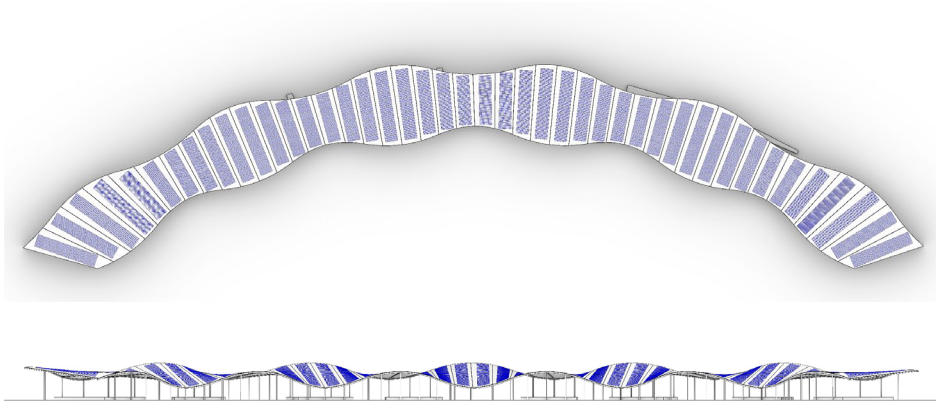
[23] Serge Ferrari  
«Membrana composite / FLEXLIGHT Advanced 902 S2 para arquitectura tensada».

<sup>i</sup> Conversación con Marian, de BatSpain, sobre posibles soluciones.



[Fig. 36] Planta y alzado de la primera configuración.

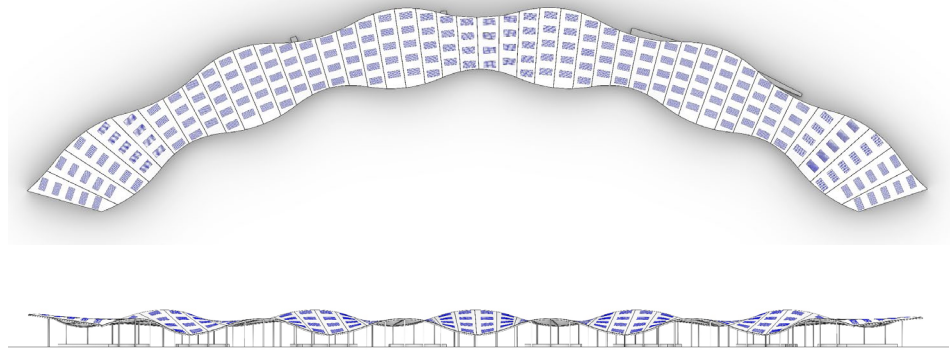
La segunda configuración mantiene un número elevado de módulos, pero organizados según un patrón radial que sigue la lógica estructural de las viguetas. Esta disposición busca un mayor orden visual y coherencia geométrica, integrando los módulos de forma más armónica con la geometría de la cubierta. En este caso los módulos FV ocupan un 50% de la superficie total de las membranas, reduciéndose (respecto a la primera opción) en un 12,3% el número de elementos fotovoltaicos y, por consecuencia, la generación eléctrica.



[Fig. 37] Planta y alzado de la segunda configuración.

Por último, la tercera configuración parte del mismo esquema radial, pero alterna tramos ocupados y vacíos —aproximadamente uno sí, uno no— lo que permite una mayor entrada de luz natural y una percepción más ligera del conjunto. En este caso, la superficie ocupada por la fotovoltaica se reduce al 27% de la superficie total, lo que supone una disminución del 52,6%, respecto a la primera opción, del número de módulos fotovoltaicos y de generación eléctrica.

[Fig. 38] Planta y alzado de la tercera configuración.



[Fig. 39] Vista inferior de la cubierta según la primera configuración.



[Fig. 40] Vista inferior de la cubierta según la primera configuración.

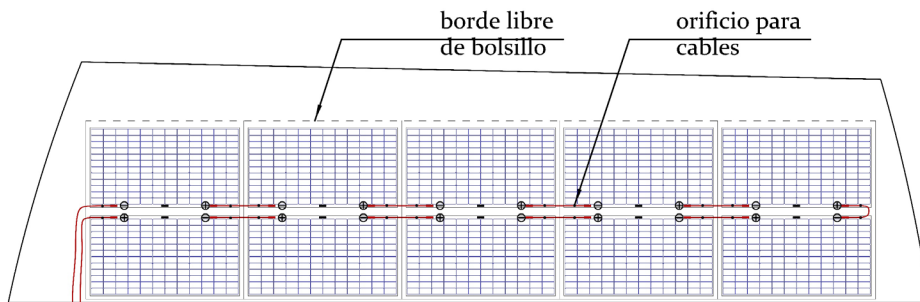


[Fig. 41] Vista inferior de la cubierta según la primera configuración.



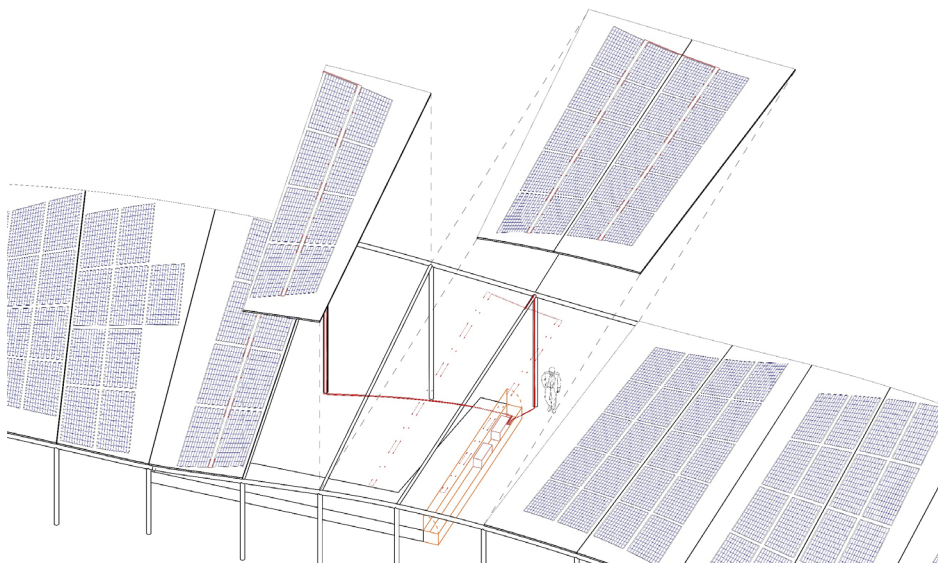
### 4.3. Diseño eléctrico y producción esperable

Para facilitar una gestión ordenada y discreta del cableado, los módulos fotovoltaicos de cada bastidor se agrupan en uno de los bordes longitudinales, permitiendo así conectar los paneles en serie y conducir el cableado por dicho borde, aprovechando el espacio entre bastidores. Desde allí, los cables descienden junto a los pilares estructurales —ya sea por su interior o adheridos exteriormente mediante canaletas técnicas— hasta alcanzar los inversores, ubicados dentro de cajas registrables integradas en los bancos existentes de la Puerta del Sol.



[Fig. 42] Esquema de conexión de captadores fotovoltaicos en un bastidor.

Esta solución permite mantener el sistema accesible para mantenimiento, sin comprometer la funcionalidad ni la percepción del mobiliario urbano. El sistema fotovoltaico tendría una potencia pico de 184,04 kWp, distribuida en 44 bastidores y 11 inversores de 15 kW de potencia nominal cada uno, de modo que cada inversor evacuaría la energía generada por 4 bastidores. El modelo de inversor seleccionado para esta aplicación es el Huawei SUN2000-15KTL-M5 [24], que, al disponer de cuatro entradas, se conectaría directamente a los cuatro bastidores asignados. La potencia nominal total del sistema en corriente alterna sería de 165 kW, resultado de la suma de las potencias nominales de los 11 inversores.

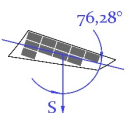
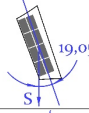
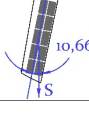
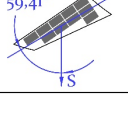


[Fig. 43] Axonometría explotada de la gestión del cableado hasta el inversor.

[24] Huawei Technologies Co., «SUN2000-12/15/17/20/25KTL-M5 (Three-Phase) | Smart Energy Controller | HUAWEI Smart PV Global».

Para estimar la producción energética del sistema propuesto, se ha tomado como referencia el módulo fotovoltaico de Sunman© seleccionado, con una potencia pico de 430 Wp [21]. El número de módulos por bastidor varía en función de su geometría y tamaño, mientras que la orientación e inclinación propias de la forma ondeante de la estructura influyen directamente en la producción eléctrica final de cada uno de ellos. Para este estudio, se ha considerado la configuración 1, en la que se instala el máximo número posible de módulos fotovoltaicos por bastidor. La producción energética esperable de las otras configuraciones se ha estimado a partir de la disminución de la potencia de los generadores descrita en la sección 4.2.

El cálculo se ha realizado mediante la herramienta PVGIS, utilizando datos climáticos reales del emplazamiento. Se presentan a continuación los resultados de cuatro bastidores, seleccionados por su carácter representativo, como ejemplo, mientras que el conjunto completo de simulaciones se recoge en el anexo de tablas, con el objetivo de no sobrecargar el cuerpo principal del documento y facilitar su lectura.

Bastidor	Esquema bastidor	Potencia FV pico bastidor (kWp)	Inclinación (°)	Azimut (°)	Producción FV anual (kWh)	Irradiación anual (kWh/m <sup>2</sup> )
01		4,30	8,26	-76,28	5.961,84	1.806,25
16		3,44	21,07	-19,05	5.374,57	2.023,51
33		4,30	2,36	10,66	5.981,4	1.816,78
44		4,30	8,26	59,41	6.037,91	1.834,04

Cabe destacar que, en este caso el azimut, en lugar de medirse respecto al norte como ocurre con los estudios del soleamiento, se mide respecto al sur, que es la referencia empleada para la definición del azimut en PVGIS. Un ángulo de 0° indica que los módulos están orientados exactamente al Sur; - 90° indica la orientación Este, 90° indica la dirección Oeste y 180° indica la dirección Norte.

La producción eléctrica total anual estimada para el conjunto del sistema alcanza los 266 MWh, con una irradiación solar global anual media sobre los módulos de 1.903,32 kWh/m<sup>2</sup>. Esta estimación permite dimensionar el impacto energético de la propuesta y contextualizar su contribución dentro de una estrategia urbana más sostenible.

[21] SUNMAN, «Sunman / Pioneer of Ultra-Light Solar».

Para poder dar una escala a estas cifras, se compara con el consumo del alumbrado de Madrid, concretamente del Distrito Centro, en 2024. En la Sede Electrónica del Ayuntamiento de Madrid están disponibles los datos relativos al alumbrado público por distrito según puntos de luz y potencia en 2024 [25], y en el Banco de Datos del Ayuntamiento de Madrid se encuentran disponibles los datos del alumbrado público por distrito según puntos de luz, potencia y consumo desde 1988 hasta 2014 [26]. Como en el primer archivo de datos mencionado no se encuentra disponible el dato relativo al consumo, se efectúa un cálculo orientativo con los datos de 2014 (el último año de ese registro), para calcular las horas de funcionamiento del alumbrado público del Distrito Centro y, así, calcular el consumo.

En el año 2014, el Distrito Centro contaba con una potencia instalada de 1.961 kW y un consumo anual de 7.922 MWh. A partir de estos datos, se puede estimar un régimen medio de funcionamiento de aproximadamente 4.040 horas al año.

En el año 2024, la potencia instalada en ese mismo distrito era de 888 kW, por lo que, suponiendo aproximadamente las mismas horas de funcionamiento del alumbrado público que en 2014, el consumo anual fue de 3.587 MWh. Bajo esta comparación, la instalación fotovoltaica propuesta, con una producción anual estimada de 266 MWh, equivaldría a cubrir aproximadamente el 7,4% del consumo eléctrico anual del alumbrado público del Distrito Centro, lo cual representa una contribución significativa dentro de una actuación urbana localizada.

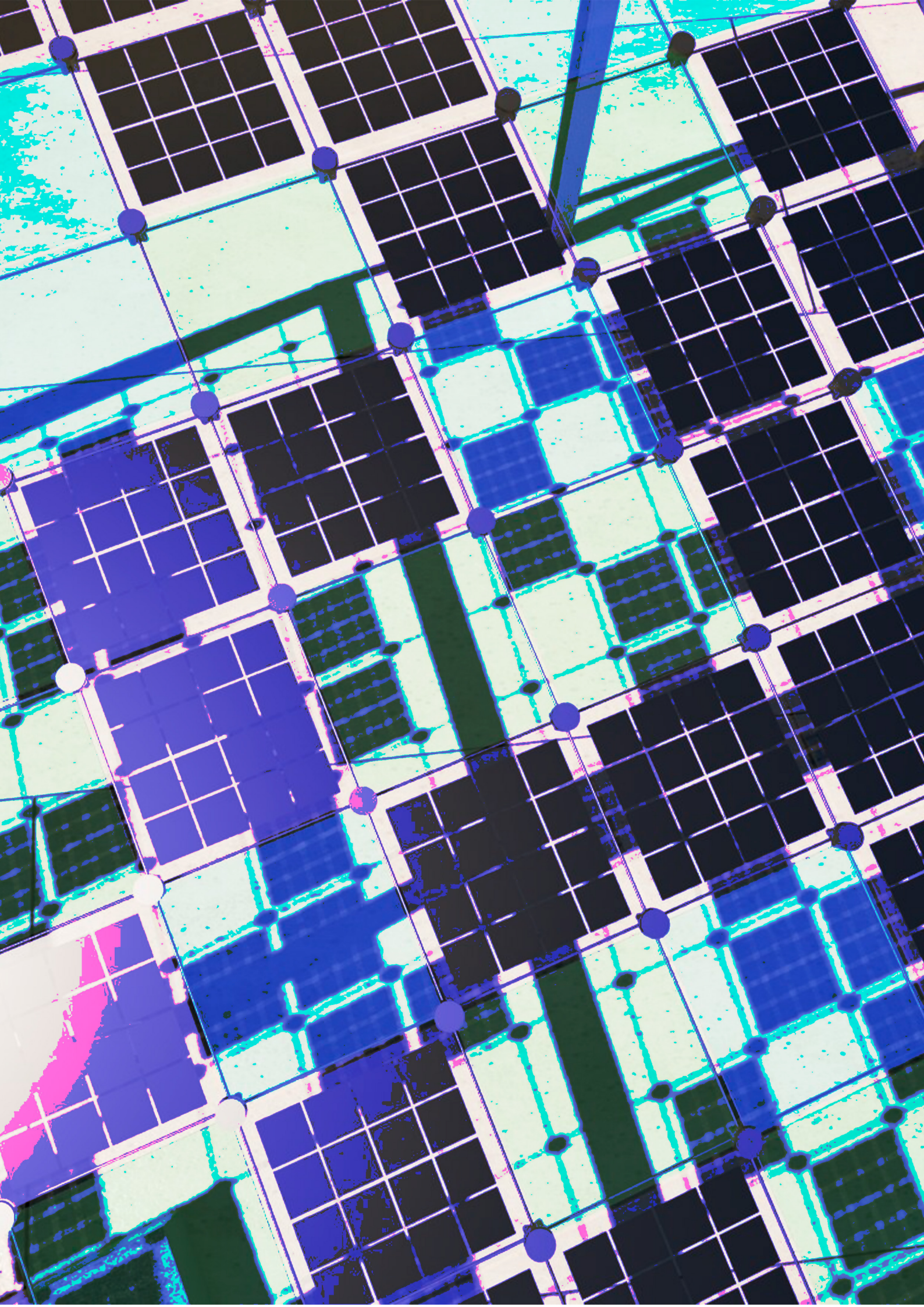
Otra forma adicional de poner en perspectiva la generación eléctrica estimada de esta propuesta es compararla con el consumo medio de una vivienda en España. Asumiendo un consumo medio anual de 21,9 kWh/m<sup>2</sup> [27], una vivienda de 100 m<sup>2</sup> consumiría 2.190 kWh al año [27]. Por tanto, la producción anual total del sistema sería suficiente para cubrir el consumo eléctrico anual de unas 120 viviendas.

[25] Ayuntamiento de Madrid, «Alumbrado público».

[26] Ayuntamiento de Madrid, «Banco de datos de Madrid».

[27] I. Del Hierro López, J. Polo, N. Martín Chivilet, F. Olivieri, E. Caamaño-Martín, y L. Olivieri, «Photovoltaic self-sufficiency potential at a district scale in Madrid. A scalable methodology».



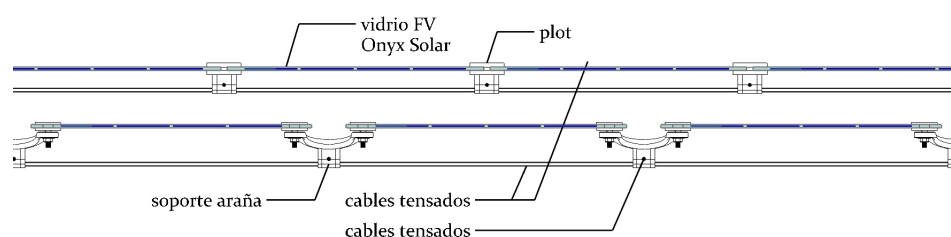


## 5. PROPUESTA 2: INTEGRACIÓN EN MALLA DE CABLES

La segunda propuesta de intervención consiste en la integración de vidrio fotovoltaico en una malla de cables tensados.

Esta estrategia busca generar un plano de sombra fragmentado, pero estructuralmente sólido, suspendido sobre la zona estancial de la Puerta del Sol, mediante una red ortogonal de cables de acero que sostiene elementos de vidrio fotovoltaico. A diferencia de la solución basada en membranas textiles, esta propuesta emplea dos posibles sistemas de fijación puntual comerciales: arañas y plots [28] — ambos derivados de tecnologías de muro cortina— que permite anclar los vidrios de forma segura y precisa, sin interferir visualmente con la composición general del conjunto.

[Fig. 44] Esquemas de los dos sistemas de integración de vidrios FV en malla de cables.



(Izq.) [Fig. 45] Plot.

(Dcha.) [Fig. 46] Araña.



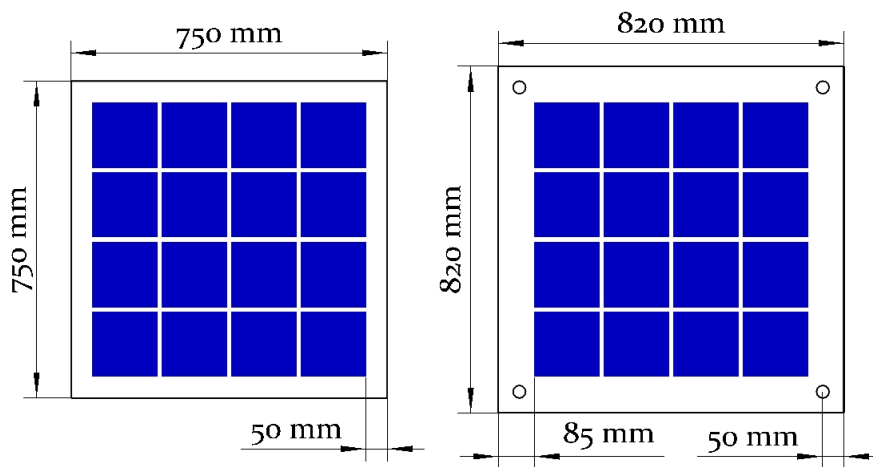
Para su desarrollo se ha seleccionado la tecnología de vidrio fotovoltaico de silicio cristalino del fabricante Onyx Solar© [29], ampliamente consolidada en integración fotovoltaica en arquitectura (BIPV) gracias a su eficiencia energética, durabilidad y posibilidad de personalización. A partir del modelo 044A0-12450635-43-M, que cuenta con una potencia pico de 81 Wp en un formato de 1245 × 635 mm con 18 células fotovoltaicas se ha optado por un formato personalizado de 750 × 750 mm para el caso de plots y 820 × 820 mm para el caso de las arañas —con pesos propios aproximados de 11,4 kg y 13,6 kg respectivamente—, en ambos casos con 16 células, manteniendo el espesor estándar de 9,8 mm.

[28] «Herrajes para cables – Vitec».

[29] «Onyx Solar, Soluciones de Fotovoltaica Integrada en Edificios».

Aplicando una regla de proporcionalidad, el nuevo módulo alcanzaría una potencia estimada de 72 Wp, permitiendo un equilibrio óptimo entre superficie ocupada, peso estructural y rendimiento energético.

La solución desarrollada combina la transparencia y la expresividad material del vidrio con la tensión estructural del cableado, creando una cobertura ligera que filtra la radiación solar sin bloquear completamente la percepción del entorno. Esta propuesta responde no solo a criterios funcionales de producción eléctrica y sombreadamiento, sino también a una voluntad compositiva que refuerza la identidad contemporánea del espacio público mediante un lenguaje tecnológico, reversible y respetuoso con el entorno construido.



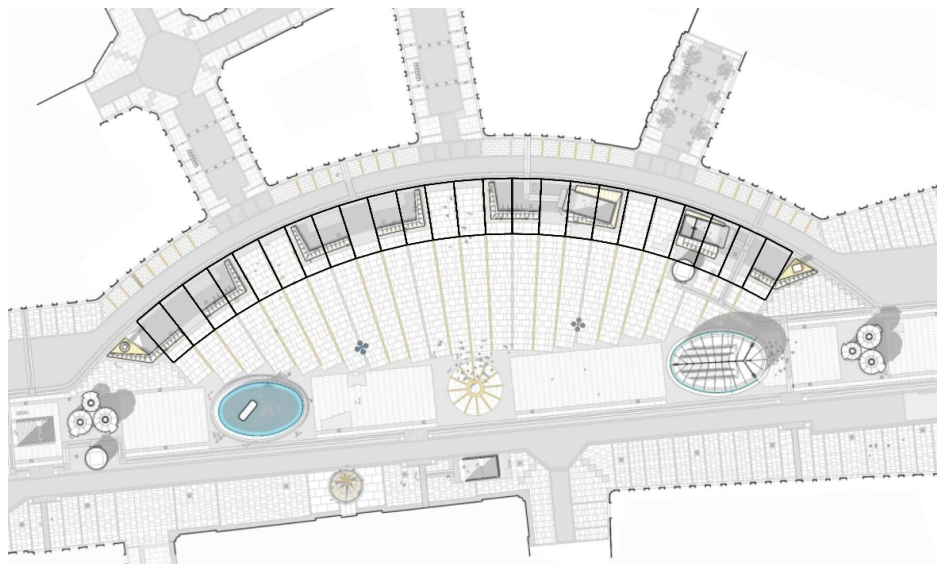
[Fig. 47] Esquemas de los vidrios FV personalizados.

Cabe destacar que para el caso de las arañas es necesario desfazar los bordes del vidrio unos centímetros ya que, al precisar de orificios para colocar los herrajes de araña, no deben quedar éstos demasiado próximos a los bordes del vidrio para evitar fracturas.

### 5.1. Diseño formal y estructural

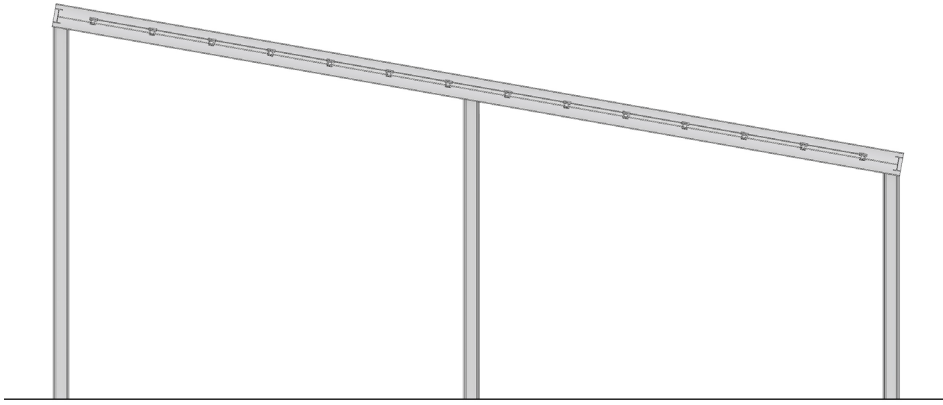
La estructura de esta propuesta se organiza en una serie de 24 sectores trapezoidales que, dispuestos radialmente, se adaptan al trazado curvo del arco de la Puerta del Sol. Cada uno de estos sectores, con una inclinación hacia el sur de  $10^\circ$ , se define por dos lados paralelos —correspondientes a la luz de las vigas principales— separados 11 metros entre sí, y por dos lados oblicuos (correspondientes a las viguetas) separadas 5,5 metros entre sí y que siguen la dirección radial del pavimento de la plaza, reforzando la integración geométrica del sistema con su entorno urbano inmediato. Esta disposición permite generar una forma curva en planta, coherente con la organización espacial del lugar y eficaz para cubrir la zona estancial con una solución modular repetible.

[Fig. 48] Esquema de los 24 sectores.

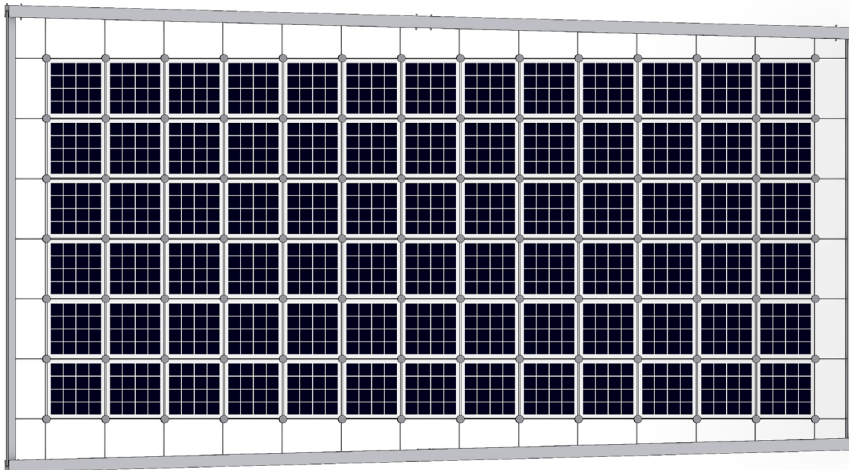


De la misma manera que en el apartado 4.1, el dimensionado de la estructura se ha realizado de forma aproximada, basándose en proporciones y escalas coherentes, ya que el objetivo principal de este trabajo no es el cálculo estructural exhaustivo, sino el desarrollo constructivo y sostenible de soluciones de integración fotovoltaica. Los elementos portantes han sido modelados con secciones y luces razonables que permiten su viabilidad técnica, pero sin profundizar en un análisis estructural completo, que quedaría fuera del alcance de este proyecto.

La estructura portante está compuesta por vigas principales IPE 300, que definen la luz mayor de cada sector y sirven de apoyo a las viguetas secundarias IPE 180, que no se disponen ortogonalmente, sino que siguen los lados oblicuos del trapecio, adaptándose a la dirección radial del conjunto. Para garantizar la estabilidad, se emplean pilares de sección HEB, distribuidos estratégicamente: HEB 200 para los pilares interiores, que asumen mayores esfuerzos estructurales, y HEB 160 para los exteriores, sometidos a cargas más reducidas. Los pilares se colocan bajo cada punto de entrega de las viguetas a las vigas principales y también a media luz de las viguetas, reduciendo así la luz libre de éstas y limitando su deformación, lo que contribuye a una solución estructural equilibrada y técnicamente viable. La malla de cables se compone de cables tensados de 10 mm de diámetro y se fija a las vigas y viguetas mediante tensores ajustables, lo que permite calibrar la tensión durante el montaje y garantizar un reparto homogéneo de esfuerzos en el sistema.



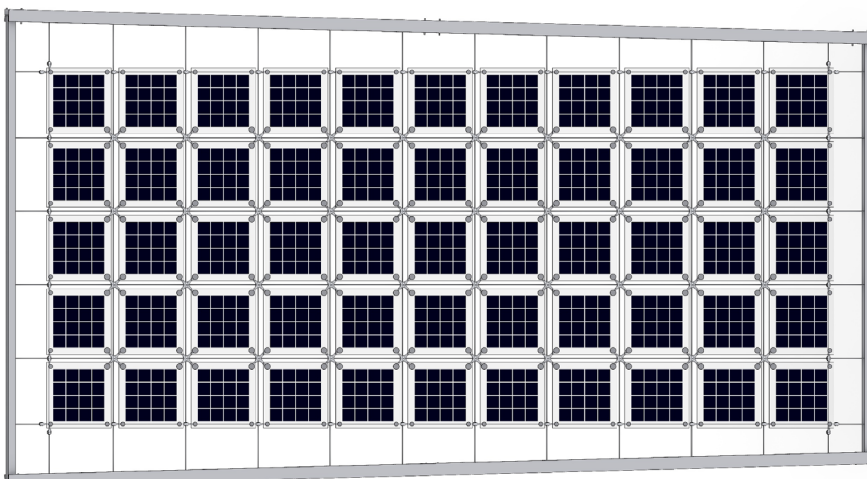
[Fig. 49] Sección de un sector con plots.



[Fig. 50] Planta de un sector con plots.



[Fig. 51] Sección de un sector con arañas.



[Fig. 52] Planta de un sector con arañas.

## 5.2. Fijación y configuración

La fijación de los módulos de vidrio a la malla de cables se plantea mediante dos opciones de herrajes puntuales, ambos derivados de sistemas habituales en muros cortina. En ambos casos, los cables se disponen por debajo del vidrio, de modo que este se apoya directamente sobre la estructura antes de ser fijado, simplificando el montaje y evitando el uso de apoyos temporales.

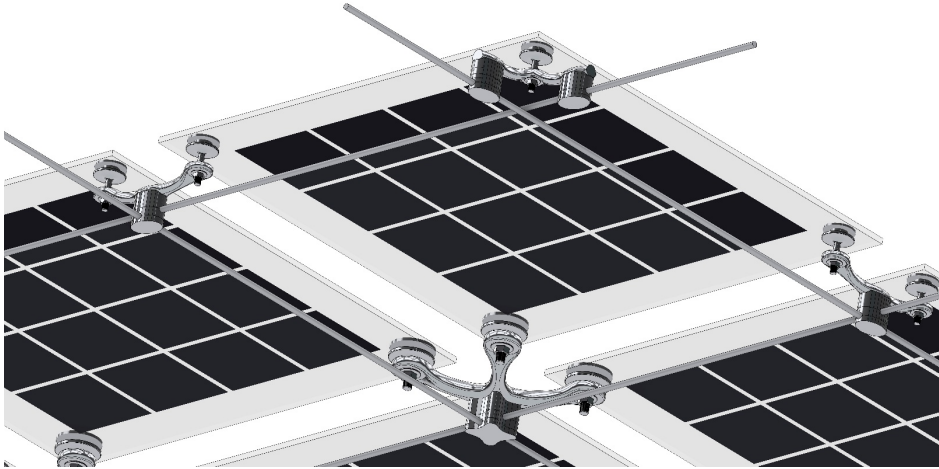
Una primera opción contempla el uso de plots mecánicos, anclados en los cruces de los cables y ajustados desde la cara superior mediante una tapa. Se trata de un sistema discreto y compacto, que permite disponer los paneles muy próximos entre sí, generando una superficie visualmente continua y poco intrusiva. Al quedar los cables y herrajes situados por debajo del vidrio, estos elementos quedan parcialmente protegidos de la suciedad y la intemperie, lo que podría favorecer su durabilidad. Su principal ventaja es la limpieza formal del conjunto, así como la facilidad de montaje desde arriba; sin embargo, esta misma configuración dificulta el acceso desde la parte inferior en caso de necesitar mantenimiento o sustitución de elementos puntuales.

[Fig. 53] Axonometría del sistema de plots.



La segunda opción se basa en el uso de arañas de acero inoxidable, también ancladas en los cruces de la malla. En este caso, el vidrio apoya sobre el cuerpo de la araña, y el sistema se ajusta desde la cara inferior. Aunque las arañas son más voluminosas, permiten una mayor separación entre paneles, lo que facilita el acceso desde abajo a la cara superior de los vidrios para tareas de limpieza o sustitución puntual, sin necesidad de desmontar todo el sistema. Esta separación, no solo deja los herrajes más expuestos al entorno (lo que puede implicar una mayor degradación por agentes atmosféricos), sino que también reduce la densidad de módulos, pasando de una matriz de 13x6 vidrios

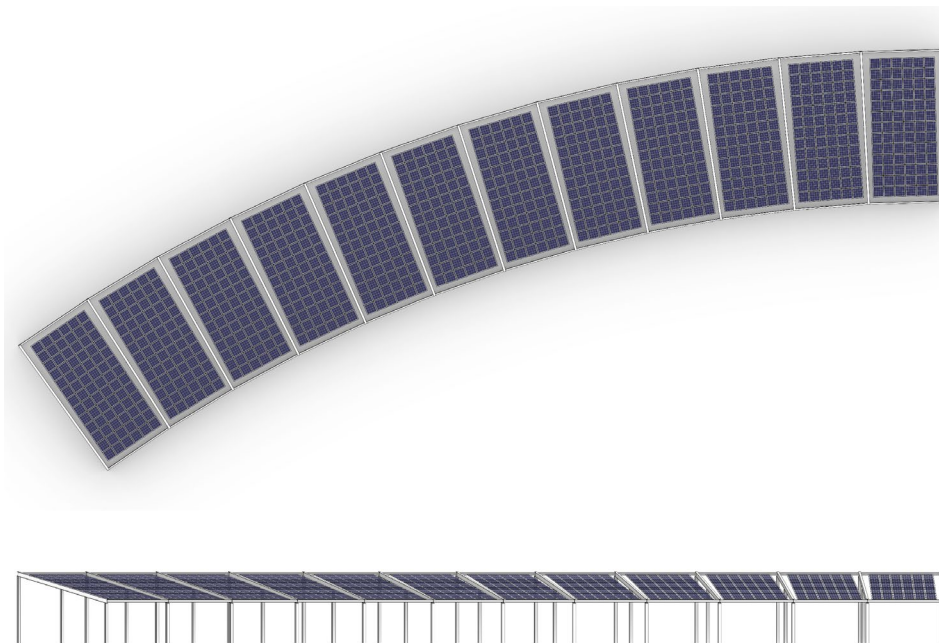
a una de 11x5 para cada sector, lo que implica una menor superficie activa de captación fotovoltaica.



[Fig. 54] Axonometría del sistema de arañas.

De la misma manera que en el punto 4.2. de la Propuesta 1, se plantean tres posibles configuraciones de superficie, que combinan módulos de vidrio fotovoltaico con paneles de vidrio no activo, con el objetivo de modular la opacidad, el paso de luz y la expresión formal de la estructura. Para ejemplificar las tres opciones se toma la estructura a base de plots, por su ligereza visual y mayor número de vidrios.

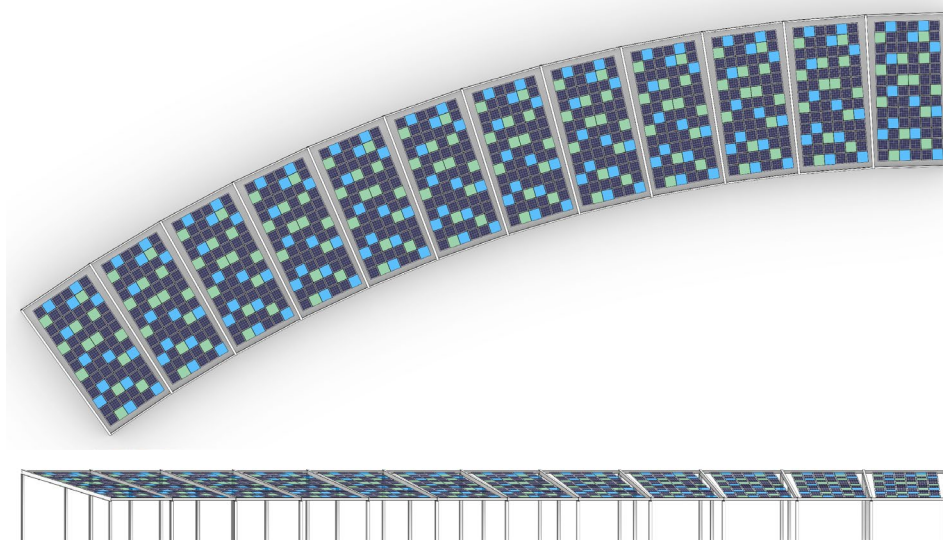
La primera configuración maximiza la producción eléctrica, cubriendo la totalidad de la malla con módulos fotovoltaicos, lo que genera una superficie sombreada prácticamente continua. En este caso hay un total de 78 vidrios por sector y un total de 1.872 en todo el conjunto.



[Fig. 55] Media planta y alzado de la primera configuración.

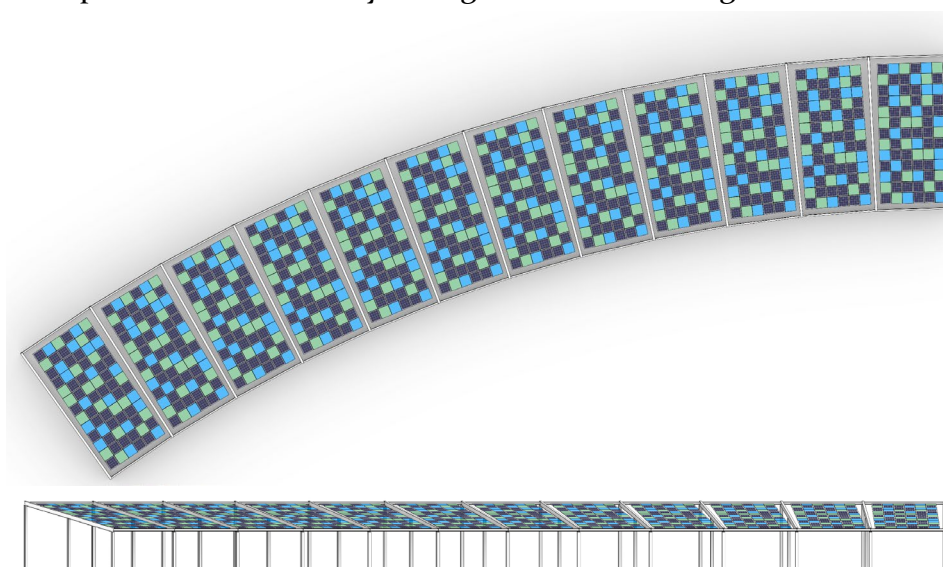
La segunda opción introduce una secuencia alterna, en la que aproximadamente dos tercios de los vidrios son fotovoltaicos y el resto son vidrios no activos (sin producción de energía). Estos últimos se plantean translúcidos y de color azul y verde, con el objetivo de aportar variaciones cromáticas al plano de sombra y generar una atmósfera más dinámica, lo que aligera visualmente el plano de sombra y permite mayor entrada de luz natural filtrada con matices de color. En este caso se colocan 52 vidrios fotovoltaicos por sector, lo que supone una reducción del 33% de la potencia total instalada y por lo tanto de la generación eléctrica esperada.

[Fig. 56] Media planta y alzado de la segunda configuración.



La tercera configuración propone un equilibrio uno a uno entre módulos fotovoltaicos y vidrios no activos, distribuidos de forma alterna, resultando en una trama aún más abierta que la anterior y con mayor transparencia desde el espacio público. En este último caso hay un total de 39 vidrios solares por sector y, por tanto, una reducción del 50% en la potencia del sistema y en la generación de energía.

[Fig. 57] Media planta y alzado de la tercera configuración.



Estas variaciones no solo permiten adaptar la propuesta a distintos niveles de producción y presupuesto, sino que también exploran distintos grados de densidad visual y percepción espacial en el entorno urbano. Además, la combinación de módulos activos y vidrios de distintos acabados o colores abre la puerta a un alto grado de personalización estética, adaptable a las características de cada emplazamiento o identidad urbana.



[Fig. 58] Vista inferior de la cubierta según la primera configuración.



[Fig. 59] Vista inferior de la cubierta según la primera configuración.

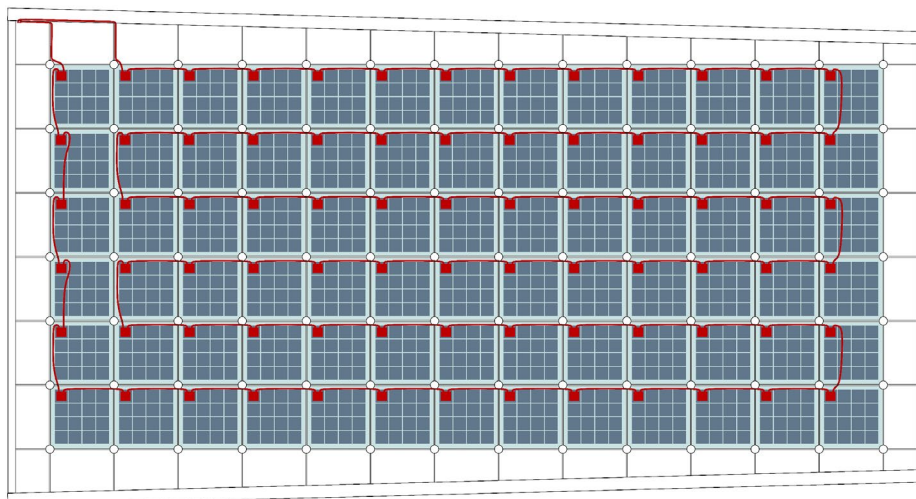


[Fig. 60] Vista inferior de la cubierta según la primera configuración.

### 5.3. Diseño eléctrico y producción esperable

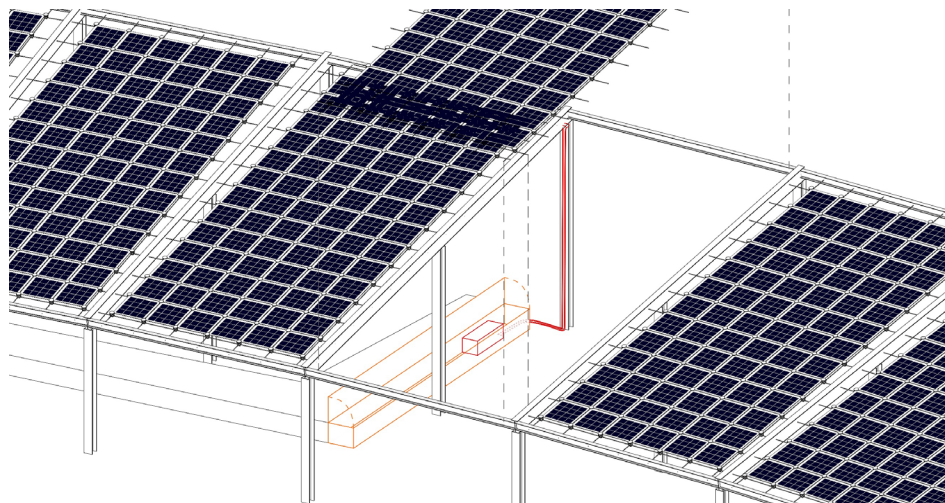
La gestión del cableado resulta relativamente sencilla ya que la malla de cables ayuda a llevar los cables eléctricos de manera ordenada y discreta. Los vidrios solares de cada sector se conectan en serie, barriando los 78 vidrios de cada sector, y el cableado desciende, de la misma manera que en la propuesta 1, por los pilares hasta conectarse a los inversores (también ubicados en cajas registrables junto a los bancos).

[Fig. 61] Esquema de conexión de los vidrios FV de un bastidor.



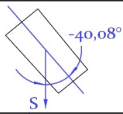
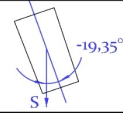
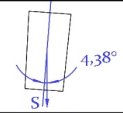
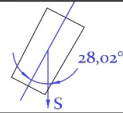
El sistema fotovoltaico en el caso de la configuración 1, tendría una potencia nominal de 135 kWp, distribuida en 24 sectores y 12 inversores de 12 kW de potencia nominal cada uno, de modo que cada inversor evacuaría la energía de 2 sectores. Para esta segunda propuesta se ha seleccionado el inversor Huawei modelo SUN2000-12KTL-M5 [24], quedando ocupadas dos de las 4 entradas de las que dispone. La potencia nominal total del sistema en corriente alterna sería de 144 kW, resultado de la suma de las potencias nominales de los 12 inversores.

[Fig. 62] Axonometría explotada de la gestión del cableado hasta el inversor.



Para la estimación de la generación eléctrica de esta propuesta, se ha tomado como referencia el vidrio fotovoltaico de Onyx Solar© personalizado, cuya potencia pico es de 72 Wp. El número de vidrios en cada sector, así como su inclinación, se mantiene constante, mientras que la orientación (azimut) de cada sector varía. Para esta aproximación, se ha considerado la configuración 1, que presenta la mayor potencia y sirve de caso base para estimar la generación de las configuraciones 2 y 3. La producción energética esperable de las otras configuraciones se ha estimado a partir de la disminución de la potencia de los generadores descrita en la sección 5.2.

Para ilustrar el procedimiento de cálculo, se presentan a continuación los resultados de cuatro sectores, seleccionados por su carácter representativo, mientras que el estudio del conjunto completo de simulaciones se recoge en el anexo de tablas.

Sector	Esquema sector	Potencia FV pico sector (kWp)	Inclinación (°)	Azimut (°)	Producción FV anual (kWh)	Irradiación anual (kWh/m <sup>2</sup> )
01		5,616	10	-40,08	8.170,09	1.891,07
08		5,616	10	-19,35	8.289,16	1.918,16
16		5,616	10	4,38	8.311,76	1.924,93
24		5,616	10	28,02	8.213,5	1.904,78

La producción eléctrica total anual estimada para el conjunto del sistema alcanza los 198 MWh, con una irradiación solar global anual media sobre los módulos de 1.915 kWh/m<sup>2</sup>. Una vez más, para dar escala a estas cifras, se compara con el consumo del alumbrado del Distrito Centro de Madrid, así como con el consumo medio de vivienda.

Como ya se ha expuesto anteriormente en el punto 4.3, el consumo anual del alumbrado público del Distrito Centro se estima en 3.587 MWh, por lo que esta instalación fotovoltaica cubriría aproximadamente el 5,5% del consumo eléctrico anual del distrito. Si bien es cierto que la aportación desciende prácticamente 2 puntos respecto a la Propuesta 1, sigue siendo una contribución relevante para la zona urbana a la que corresponde. Por otro lado, contextualizando respecto al consumo medio de viviendas en España, si una vivienda de unos 100 m<sup>2</sup>, como se ha comentado anteriormente en el apartado 4.3, consume

[27] I. Del Hierro López, J. Polo, N. Martín Chivelet, F. Olivieri, E. Caamaño-Martín, y L. Olivieri, «Photovoltaic self-sufficiency potential at a district scale in Madrid. A scalable methodology».

2.190 kWh al año [27], este sistema —con una producción de 198 kWh/año— cubriría el consumo de unas 90 viviendas.



## CONCLUSIONES

Este trabajo ha explorado las posibilidades reales de integración de tecnología fotovoltaica en sistemas de arquitectura textil, tomando como caso de estudio la Puerta del Sol de Madrid, uno de los espacios urbanos más representativos de la ciudad y, al mismo tiempo, uno de los más desfavorables en términos bioclimáticos. Ante la ausencia de sombra y la acumulación térmica provocada el uso intensivo de materiales pesados y de alta inercia térmica del entorno construido, se proponen dos intervenciones arquitectónicas con un doble objetivo: proporcionar protección climática y generar energía limpia in situ, mediante la incorporación de módulos fotovoltaicos en estructuras ligeras.

Para ello, se ha desarrollado una metodología combinada que integra análisis climático, modelado digital, simulación energética y evaluación comparativa. El soleamiento se ha estudiado con Shadowmap, el diseño 3D con Rhinoceros 3D y MPanel, y la producción eléctrica mediante PVGIS, considerando orientación, inclinación y condiciones locales. Este conjunto de herramientas ha permitido abordar las propuestas desde un enfoque técnico riguroso, integrando aspectos estructurales, energéticos y urbanos. El desarrollo completo de ambas soluciones ha facilitado su comparación y ha demostrado su viabilidad como estrategias reales de mejora ambiental en el espacio público.

La Propuesta 1 se materializa como una estructura de membrana tensada, compuesta por bastidores desmontables de tela PVC con bolsillos de ETFE que alojan módulos fotovoltaicos comerciales ligeros. Su forma sinuosa no solo aporta calidad espacial y valor estético, sino que también responde a criterios de captación solar, evacuación pluvial y permeabilidad visual en el espacio urbano. El sistema, concebido para ser versátil, contempla distintas configuraciones de colocación de los módulos, lo que permite regular el nivel de sombra y la densidad visual según las necesidades del lugar. Con una producción eléctrica anual estimada de 266 MWh, este sistema cubriría un 7,4 % del consumo anual del alumbrado público del Distrito Centro o el equivalente al consumo eléctrico anual de unas 120 viviendas tipo en España, lo que demuestra un impacto energético significativo para una intervención localizada.

Por su parte, la Propuesta 2 plantea la integración de vidrio fotovoltaico en una malla de cables tensados, conformando una superficie activa suspendida mediante fijaciones puntuales. En el desarrollo de esta propuesta se han estudiado dos sistemas de anclaje —plots y

arañas—, que permiten diferentes grados de limpieza formal, accesibilidad al mantenimiento y densidad de módulos instalables. Al igual que en la propuesta anterior, se han definido tres configuraciones distintas que combinan módulos activos e inactivos para ofrecer soluciones adaptables en función de criterios técnicos, económicos o compositivos. Con una producción eléctrica anual estimada de 135 MWh, esta intervención cubriría aproximadamente el 3,7 % del consumo del alumbrado público del Distrito Centro, o el equivalente al consumo anual de unas 90 viviendas. A pesar de que su aportación energética es menor, ofrece otras ventajas relevantes, como una mayor durabilidad del material, una integración visual más sólida y la posibilidad de emplear distintos acabados de vidrio para personalizar el efecto de sombra y luz en el espacio público.

Ambas propuestas ponen de manifiesto la diversidad de enfoques posibles dentro de la arquitectura textil fotovoltaica. Mientras la primera opción maximiza el rendimiento energético y la ligereza estructural, la segunda ofrece mayor solidez, presencia visual y flexibilidad compositiva. En ambos casos, se ha demostrado la viabilidad técnica de integrar tecnología fotovoltaica en soluciones textiles, tanto mediante productos flexibles como mediante vidrio, siempre que se adapten los sistemas de anclaje, el patrón de colocación y la gestión del cableado a las particularidades de cada tipología.

Más allá de los valores energéticos concretos, el trabajo subraya el potencial de estas intervenciones como herramientas activas para repensar el espacio urbano: estructuras ligeras, reversibles, con capacidad para mitigar el impacto climático local y, al mismo tiempo, para aportar identidad formal y valor ambiental. Las posibilidades de personalización, adaptabilidad y modularidad las convierten en estrategias especialmente valiosas para contextos urbanos consolidados donde la transformación del espacio público debe ser precisa, reversible y con impacto tangible.

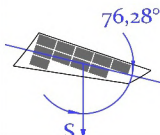
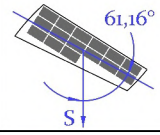
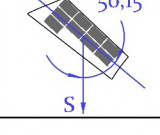
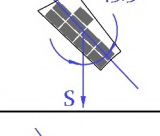
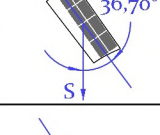
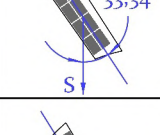
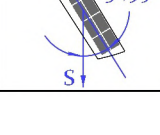
Este trabajo pretende abrir caminos posibles entre sostenibilidad energética, diseño urbano y arquitectura ligera. Si bien se han empleado productos comerciales disponibles y métodos de simulación accesibles, las tecnologías emergentes en el ámbito de los tejidos solares o las membranas fotovoltaicas integradas, descritas en el estado del arte, abren nuevas vías de investigación que podrían ampliar aún más el alcance y la aplicabilidad de estas estrategias. En definitiva, la arquitectura textil fotovoltaica no solo puede responder a necesidades funcionales inmediatas, sino también actuar como catalizador de un modelo urbano más flexible, habitable y energéticamente consciente, al que dar entrada a través de una auténtica PUERTA DEL SOL.

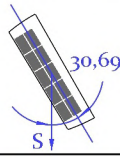
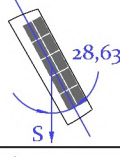
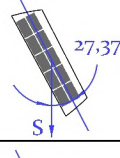
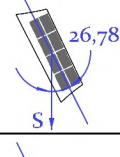
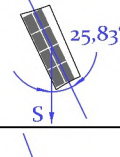
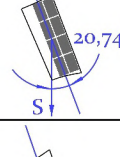
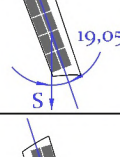
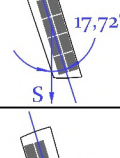
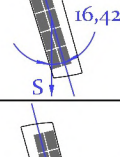
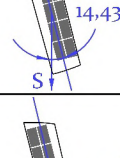
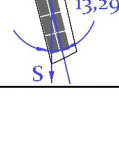


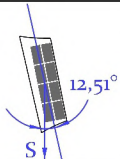
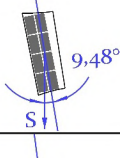
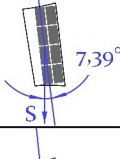
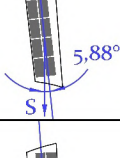
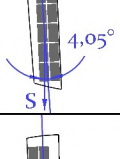
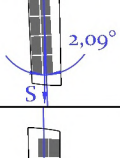
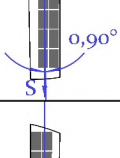
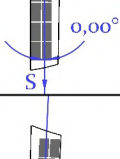
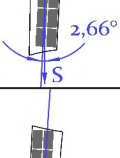
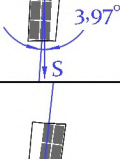
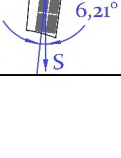


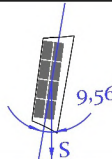
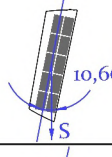
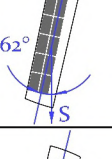
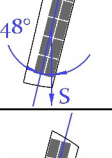
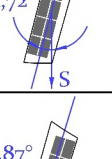
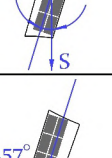
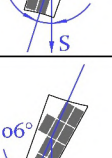
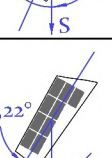
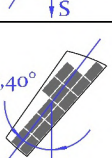
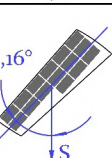

# ANEXO DE TABLAS

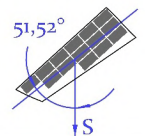
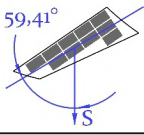
## A. Producción eléctrica estimada de la Propuesta 1: análisis por bastidor.

Bastidor	Esquema bastidor	Potencia FV pico bastidor (kWp)	Inclinación (°)	Azimut (°)	Producción FV anual (kWh)	Irradiación anual (kWh/m <sup>2</sup> )
01		4,30	8,26	-76,28	5.961,84	1.806,25
02		6,02	0	-67,59	8.187,18	1.779,45
03		6,45	0	-61,16	8.771,99	1.779,45
04		5,59	0	-54,71	7.602,40	1.779,45
05		3,87	15,8	-50,15	5.694,2	1.908,45
06		3,87	33	-43,31	5.958,44	1.988,86
07		3,44	34,24	-36,70	5.377,13	2.018,64
08		3,44	21,07	-33,34	5.294,74	1.992,95
09		4,30	2,36	-31,99	5.294,75	1.922,95

Bastidor	Esquema bastidor	Potencia FV pico bastidor (kWp)	Inclinación (°)	Azimut (°)	Producción FV anual (kWh)	Irradiación anual (kWh/m <sup>2</sup> )
10		4,30	0	-30,69	5.848,02	1.779,46
11		4,30	0	-28,63	5.848,02	1.779,46
12		4,30	2,36	-27,37	5.972,51	1.813,64
13		3,44	21,07	-26,78	5.336,55	2.008,69
14		3,44	34	-25,83	5.480	2.058,67
15		3,44	34	-20,74	5.517,59	2.073,09
16		3,44	21,07	-19,05	5.374,57	2.023,51
17		4,30	2,36	-17,72	5.980,46	1.816,03
18		4,30	0	-16,42	5.848,02	1.779,46
19		4,30	0	-14,43	5.848,02	1.779,46
20		4,30	2,36	-13,29	5.982,85	1.816,78

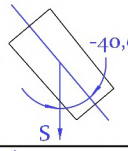
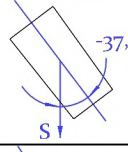
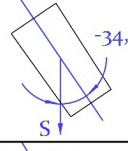
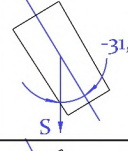
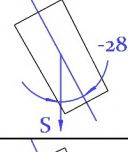
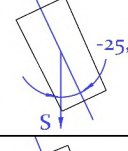
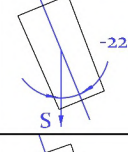
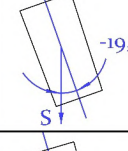
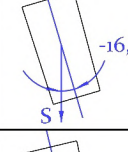
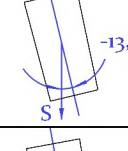
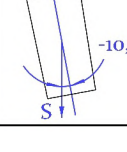
Bastidor	Esquema bastidor	Potencia FV pico bastidor (kWp)	Inclinación (°)	Azimut (°)	Producción FV anual (kWh)	Irradiación anual (kWh/m <sup>2</sup> )
21		3,44	21,07	-12,51	5.395,49	2.032,09
22		3,44	34	-9,48	5.565,68	2.090,99
23		3,44	34	-7,39	5.566,95	2.091,95
24		3,44	21,07	-5,88	5.405,86	2.036,85
25		4,30	2,36	-4,05	5.985,17	1.817,59
26		4,30	0	-2,09	5.848,02	1.779,46
27		4,30	0	-0,9	5.848,02	1.779,46
28		4,30	2,36	0	5.985,04	1.817,62
29		3,44	21,07	2,66	5.402,73	2.036,56
30		3,44	34	3,97	5.562,7	2.092,18
31		3,44	34	6,21	5.556,63	2.090,63

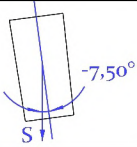
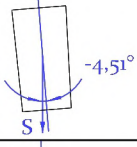
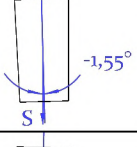
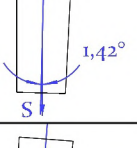
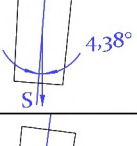
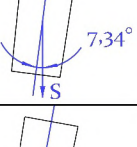
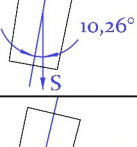
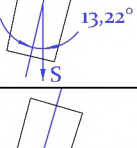
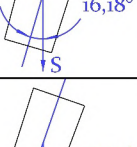
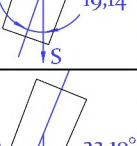
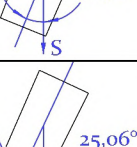
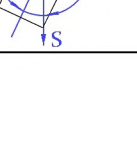
Bastidor	Esquema bastidor	Potencia FV pico bastidor (kWp)	Inclinación (°)	Azimut (°)	Producción FV anual (kWh)	Irradiación anual (kWh/m <sup>2</sup> )
32		3,44	21,07	9,56	5.386,94	2.031,2
33		4,30	2,36	10,66	5.981,4	1.816,78
34		4,30	0	12,62	5.848,02	1.779,46
35		4,30	0	13,48	5.848,02	1.779,46
36		4,30	2,36	14,72	5.978,77	1.816,11
37		3,44	21,07	16,87	5.357,05	2.021,06
38		3,44	34	17,57	5.493,53	2.070,58
39		3,87	33	24,06	6.114,4	2.050,44
40		3,87	15,8	32,22	5.800,49	1.949,49
41		5,59	0	37,40	7.602,41	1.779,46
42		6,45	0	44,16	8.772	1.779,46

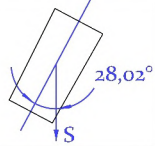
Bastidor	Esquema bastidor	Potencia FV pico bastidor (kWp)	Inclinación (°)	Azimet (°)	Producción FV anual (kWh)	Irradiación anual (kWh/m <sup>2</sup> )
43		6,02	0	51,52	8.187,2	1.779,45
44		4,30	8,26	59,41	6.037,91	1.834,04

	Esquema bastidor	Potencia FV pico (kWp)	Inclinación (°)	Azimet (°)	Producción FV anual (kWh)	Irradiación anual media (kWh/m <sup>2</sup> )
TOTAL	—	184,04	—	—	266.382,37	1.903,33

## B. Producción eléctrica estimada de la Propuesta 2: análisis por sector.

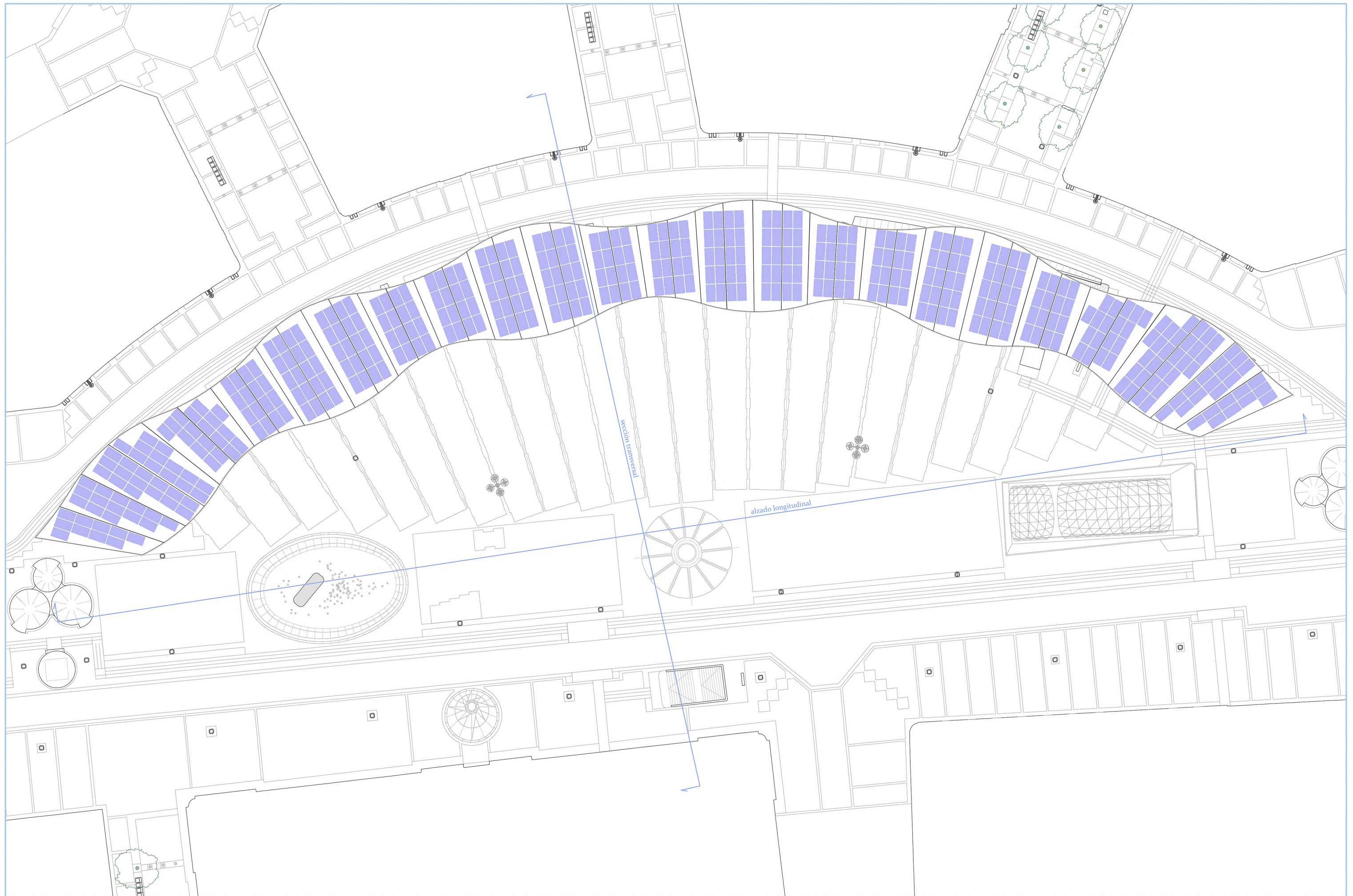
Sector	Esquema sector	Potencia FV pico sector (kWp)	Inclinación (°)	Azimet (°)	Producción FV anual (kWh)	Irradiación anual (kWh/m <sup>2</sup> )
01		5,616	10	-40,08	8.170,09	1.891,07
02		5,616	10	-37,11	8.192,3	1.896,12
03		5,616	10	-34,15	8.212,81	1.900,79
04		5,616	10	-31,19	8.231,66	1.905,11
05		5,616	10	-28,23	8.248,72	1.909,03
06		5,616	10	-25,27	8.264,01	1.912,57
07		5,616	10	-22,31	8.277,5	1.915,72
08		5,616	10	-19,35	8.289,16	1.918,16
09		5,616	10	-16,39	8.298,95	1.920,79
10		5,616	10	-13,43	8.306,84	1.922,71
11		5,616	10	-10,47	8.312,19	1.924,19

Sector	Esquema sector	Potencia FV pico sector (kWp)	Inclinación (°)	Azimut (°)	Producción FV anual (kWh)	Irradiación anual (kWh/m <sup>2</sup> )
12		5,616	10	-7,50	8,316,44	1.925,15
13		5,616	10	-4,51	8,317,96	1.925,66
14		5,616	10	-1,55	8,317,79	1.925,83
15		5,616	10	1,42	8,315,69	1.925,58
16		5,616	10	4,38	8,311,76	1.924,93
17		5,616	10	7,34	8,305,9	1.923,85
18		5,616	10	10,26	8,298,24	1.922,37
19		5,616	10	13,22	8,288,62	1.920,45
20		5,616	10	16,18	8,277,14	1.918,11
21		5,616	10	19,14	8,263,85	1.915,37
22		5,616	10	22,10	8,248,82	1.912,23
23		5,616	10	25,06	8,232,05	1.908,71

Sector	Esquema sector	Potencia FV pico sector	Inclinación (°)	Azimut (°)	Producción FV anual (kWh)	Irradiación anual (kWh/m <sup>2</sup> )
24		5,616	10	28,02	8.213,5	1.904,78

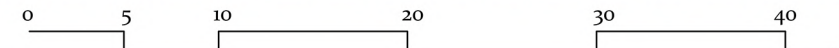
	Esquema sector	Potencia FV pico (kWp)	Inclinación (°)	Azimut (°)	Producción FV anual (kWh)	Irradiación anual media (kWh/m <sup>2</sup> )
TOTAL	—	134,8	—	—	198.495,52	1.915,24

# **ANEXO DE PLANOS E IMÁGENES**



PLANTA DE LA PROPUESTA 1: Integración sobre membrana

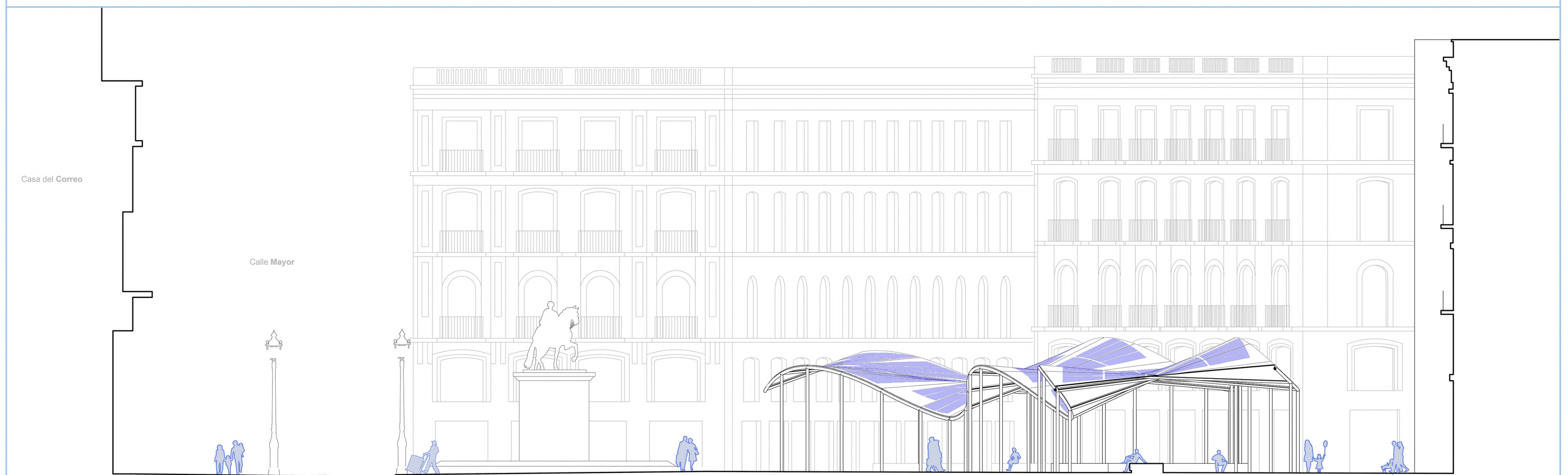
ESCALA 1:400





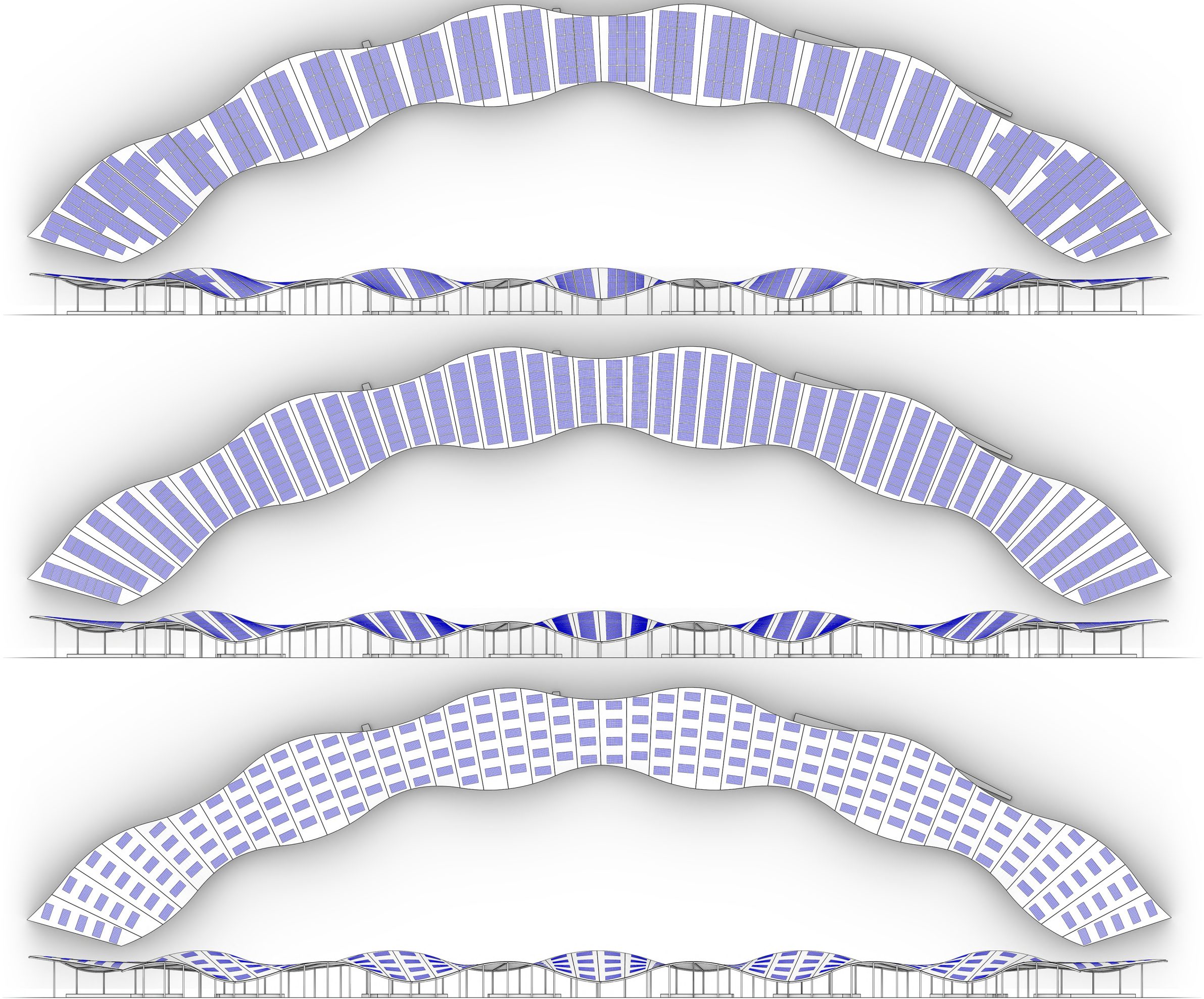
ALZADO LONGITUDINAL DE LA PROPUESTA 1: Integración sobre membrana

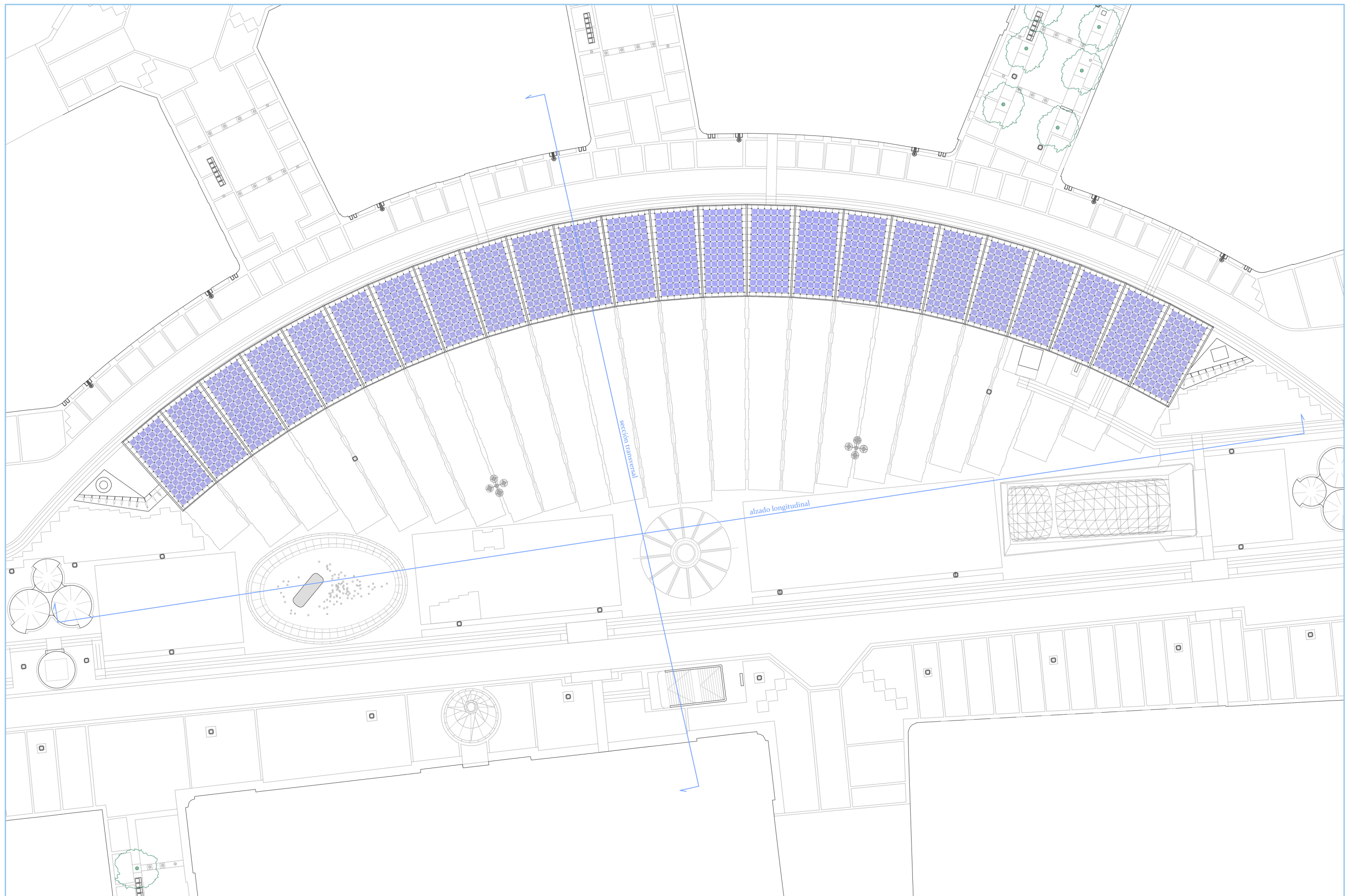
ESCALA 1:400 0 5 10 20 30 40



SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA PROPUESTA 1: Integración sobre membrana

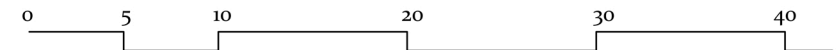
ESCALA 1:200 0 1 5 10 15 30





PLANTA DE LA PROPUESTA 2: Integración en malla de cables

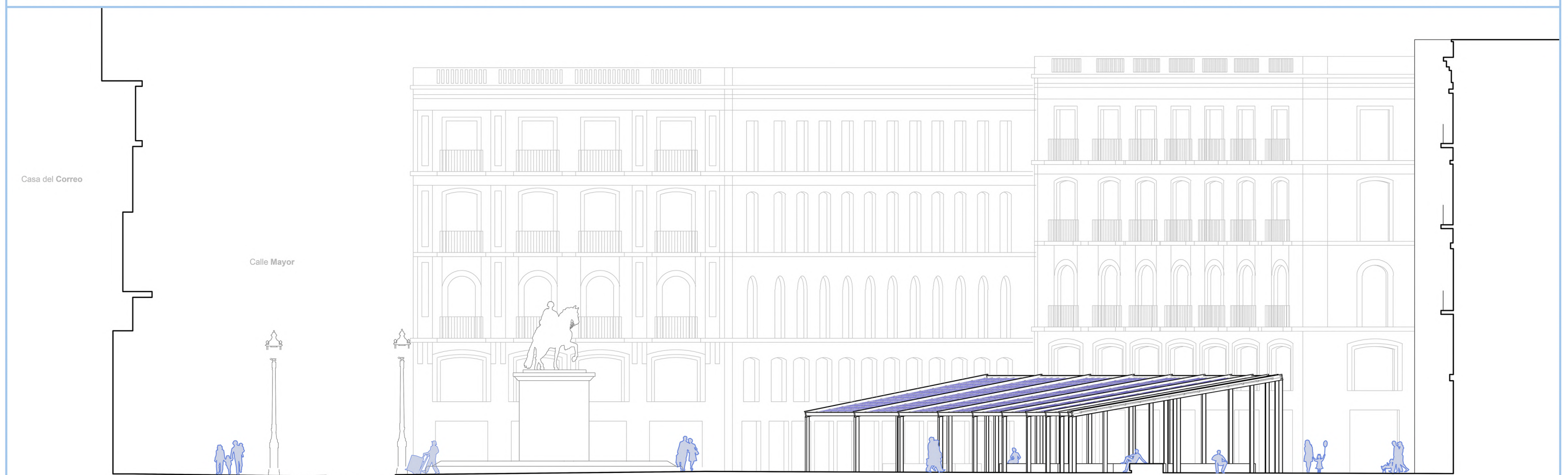
ESCALA 1:400





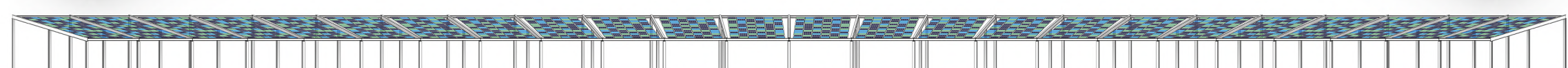
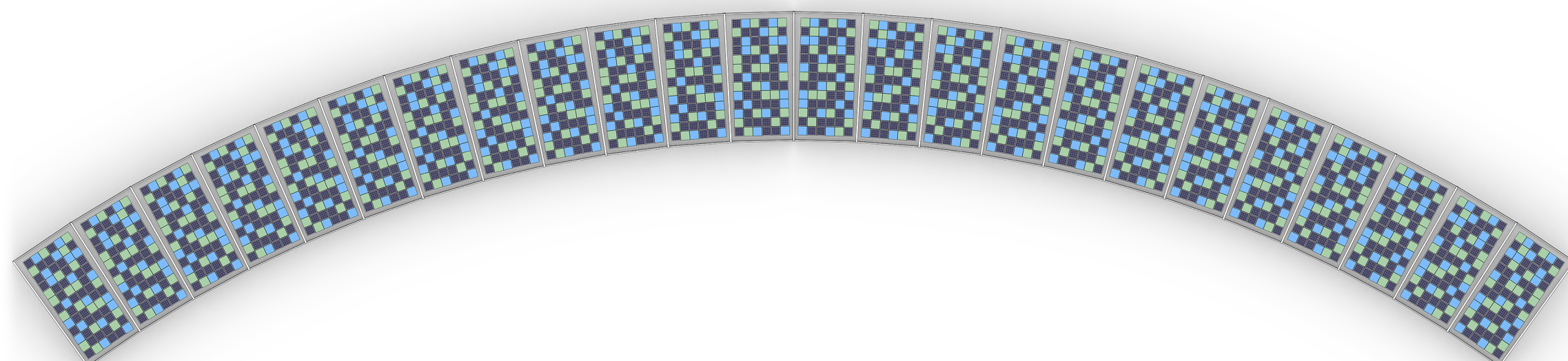
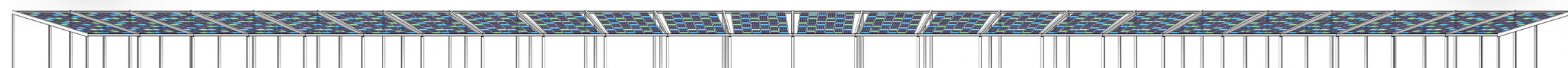
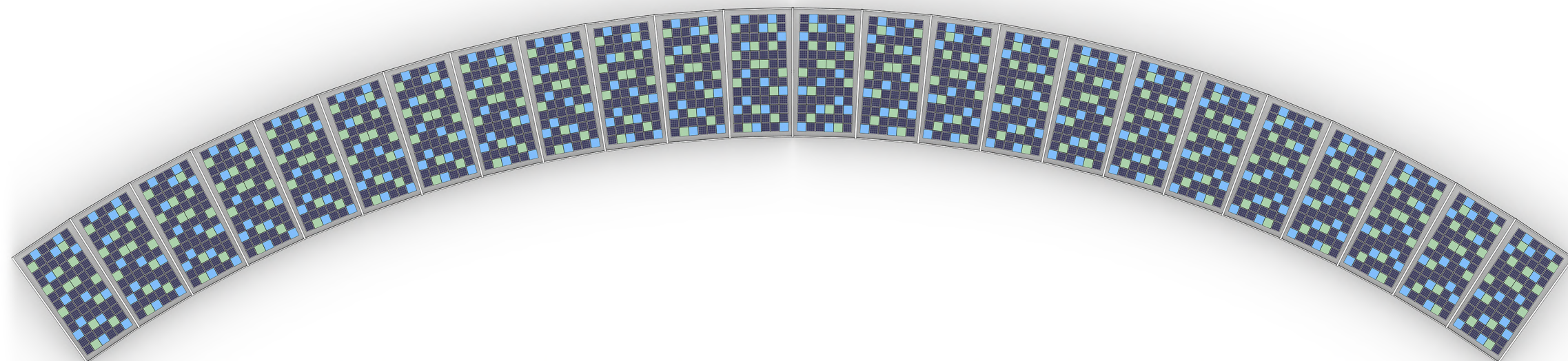
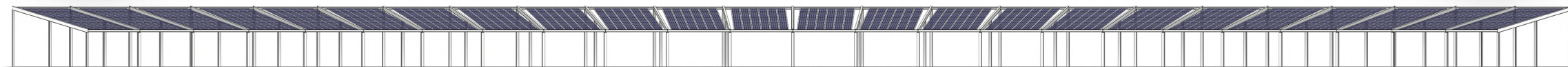
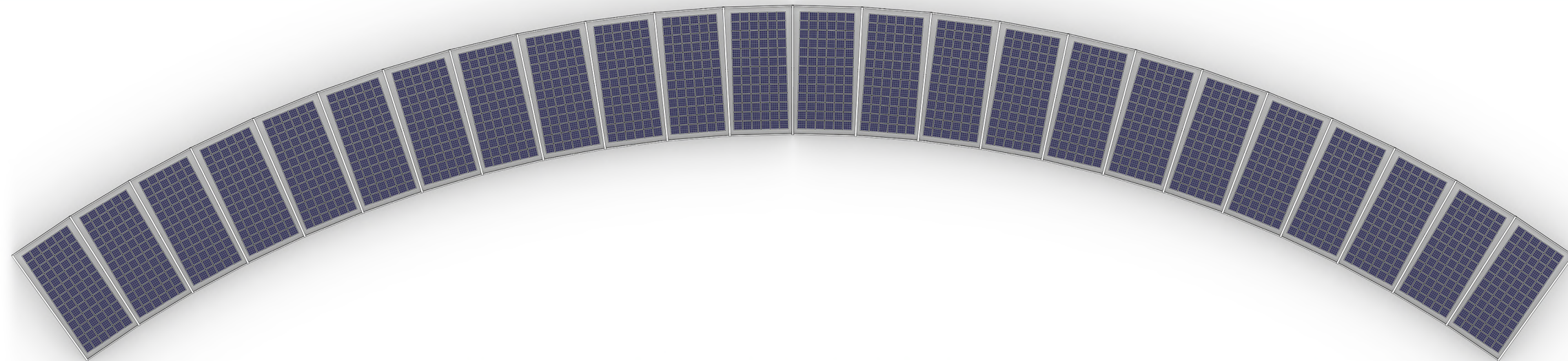
ALZADO LONGITUDINAL DE LA PROPUESTA 2: Integración en malla de cables

ESCALA 1:400 0 5 10 20 30 40



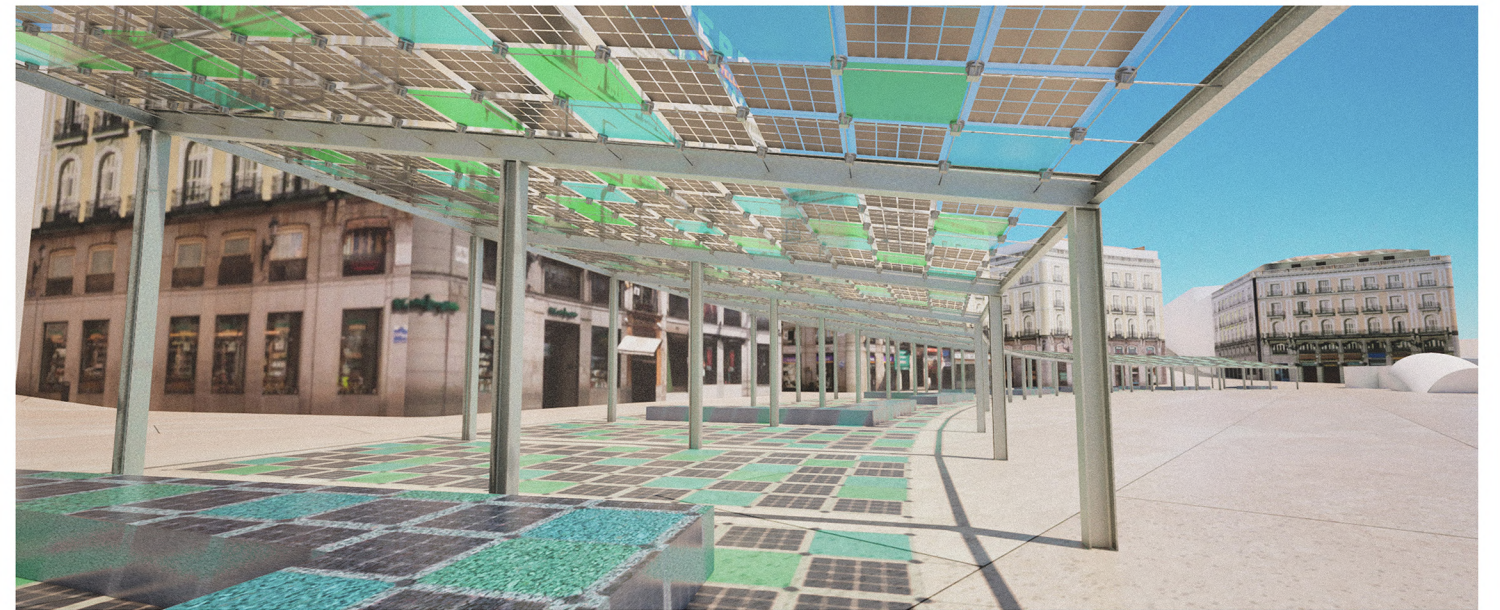
SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA PROPUESTA 2: Integración en malla de cables

ESCALA 1:200 0 1 5 10 15 30





VISTAS DE LAS 3 CONFIGURACIONES DE LA PROPUESTA 1



VISTAS DE LAS 3 CONFIGURACIONES DE LA PROPUESTA 2

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] United Nations Environment Programme (UNEP) y Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC), *2023 Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations - Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. United Nations Environment Programme, 2024. doi: 10.59117/20.500.11822/45095.
- [2] F. Klassen, «Material Innovations: Transparent, lightweight, malleable & responsive», dic. 2023. doi: <https://doi.org/10.32920/24101475.v1>.
- [3] A. Huang, S. Lewis, y J. Gillette, «Pure Tension: Intuition, Engineering & Fabrication», *CAADRIA*, pp. 171-180, 2014, [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/121248216/Pure\\_Tension\\_Intuition\\_Engineering\\_and\\_amp\\_Fabrication](https://www.academia.edu/121248216/Pure_Tension_Intuition_Engineering_and_amp_Fabrication)
- [4] A. Menéndez *et al.*, «A multifunctional ETFE module for sustainable façade lighting: Design, manufacturing and monitoring», *Energy Build*, vol. 161, pp. 10-21, feb. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.023>.
- [5] J. M. Cremers, «Energy saving design of membrane building envelopes», en *Textiles composites and inflatable structures V: proceedings of the V International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures*, Barcelona, Spain: CIMNE, oct. 2011, pp. 147-157. doi: <http://hdl.handle.net/2117/185974>.
- [6] M. Ohno, «Structural Design of the Japan pavilion in Shanghai Expo», *Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanised Areas*, pp. 846-847, 2010, doi: 10.2749/222137810796064057.
- [7] Q. Li y A. Zanelli, «A review on fabrication and applications of textile envelope integrated flexible photovoltaic systems», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 139, p. artículo 110678, abr. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2020.110678.
- [8] K. U. Bletzinger, Bernd. Kröplin, y Eugenio. Oñate Ibáñez de Navarra, «Innovative membrane architecture for carport in Munich», en *VI International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures*, Barcelona: CIMNE, oct. 2013, pp. 352-362. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/185635>
- [9] Carl Stahl Architektur, «EXPO Milano 2015 - German Pavilion». [En línea]. Disponible en: <https://carlstahl-architektur.com/en/referenzen/detail/expo-milano-2015-deutscher-pavillon>
- [10] A. Monteleone, G. Rodonò, A. Gagliano, y V. Sapienza, «SLICE - Solar Lightweight Intelligent Component for Envelopes: application for the

- ICARO pavilion», *Rivista Tema*, vol. 8, n.o N. 2 (2022), oct. 2022, doi: 10.30682/TEMA0802G.
- [11] «SUNTEX - Pauline van Dongen». Accedido: 24 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.paulinevandongen.nl/portfolio/suntex/>
- [12] «Osaka | Overtreders W I Architectural design». Accedido: 24 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.overtreders-w.nl/osaka>
- [13] P. Van Dongen, E. Britton, A. Wetzel, R. Houtman, A. M. Ahmed, y S. Ramos, «Suntex: Weaving Solar Energy Into Building Skin», *Journal of Facade Design and Engineering*, vol. 10, n.o 2, pp. 141-160, dic. 2022, doi: 10.47982/jfde.2022.powerskin.9.
- [14] «¿Qué es una célula solar de perovskita? | ▷ Máster de energía solar fotovoltaica <». Accedido: 24 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://mastersolar.ies.upm.es/que-es-una-celula-solar-de-peruskita/>
- [15] R. Scotta, M. Lazzari, E. Stecca, R. Di Massimo, y R. Vitaliani, «Membranes with embedded photovoltaic flexible cells: Structural and electrical performances under uniaxial and biaxial stresses», *Compos Struct*, vol. 157, pp. 111-120, dic. 2016, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.08.003.
- [16] Y. Yan, W. Chen, J. Hu, y I. Tariq, «Long-term testing study of tensile ETFE, PTFE and PVDF membrane structure integrated thin Si-PV», *Solar Energy*, vol. 289, p. 113307, mar. 2025, doi: 10.1016/J.SOLENER.2025.113307.
- [17] Dirección General del Espacio Público y Cota Cero Estudios Urbanos y Territoriales SLP, «PLAN DE ACTUACIONES DE LA PUERTA DEL SOL (MADRID) 2/157», dic. 2016. Accedido: 2 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: PLAN DE ACTUACIONES DE LA PUERTA DEL SOL (MADRID) 2/157
- [18] «JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission». Accedido: 24 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/es/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/)
- [19] «PVGIS data sources & calculation methods - European Commission». Accedido: 24 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/getting-started-pvgis/pvgis-data-sources-calculation-methods\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/getting-started-pvgis/pvgis-data-sources-calculation-methods_en)
- [20] «Plataforma de Contratación del Sector Público». Accedido: 27 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en:

[https://contrataciondelestado.es/wps/portal/!ut/p/b0/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMA-fljU1JTC3ly87KtUULEnNyUuNzMpMzSxKTgQr0w\\_Wj9KMyU1zLcvQjTc qLjDL Dyr0jCr3CCk2CLavKEgMLAm1t9Qtycx0BUUVZgQ!!/](https://contrataciondelestado.es/wps/portal/!ut/p/b0/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMA-fljU1JTC3ly87KtUULEnNyUuNzMpMzSxKTgQr0w_Wj9KMyU1zLcvQjTc qLjDL Dyr0jCr3CCk2CLavKEgMLAm1t9Qtycx0BUUVZgQ!!/)

- [21] SUNMAN, «Sunman / Pioneer of Ultra-Light Solar». Accedido: 20 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.sunman-energy.com/eArc>
- [22] Forsstrom High Frequency AB, «¿Qué es la soldadura por HF?» Accedido: 21 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.forsstrom.com/es/tecnologia-hf/que-es-la-soldadura-por-hf/>
- [23] Serge Ferrari, «Membrana composite / FLEXLIGHT Advanced 902 S2 para arquitectura tensada». Accedido: 21 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.sergeferrari.com/es-es/productos/gama-tenseo/tenseo-advanced-902-s2>
- [24] Huawei Technologies Co., «SUN2000-12/15/17/20/25KTL-M5 (Three-Phase) | Smart Energy Controller | HUAWEI Smart PV Global». Accedido: 24 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://solar.huawei.com/en/products/SUN2000-12-15-17-20-25KTL-M5/>
- [25] Ayuntamiento de Madrid, «Alumbrado público». Accedido: 22 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Medio-ambiente/Alumbrado-publico/?vgnnextfmt=default&vgnnextoid=7255786b10a59210VgnVCM2000000c205a0aR-CRD&vgnnextchannel=3edd31d3b28fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD](https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Medio-ambiente/Alumbrado-publico/?vgnnextfmt=default&vgnextoid=7255786b10a59210VgnVCM2000000c205a0aR-CRD&vgnnextchannel=3edd31d3b28fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD)
- [26] Ayuntamiento de Madrid, «Banco de datos de Madrid». Accedido: 22 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://servpub.madrid.es/CSEBD\\_WBINTER/seleccionSerie.html?numSerie=080102000011](https://servpub.madrid.es/CSEBD_WBINTER/seleccionSerie.html?numSerie=080102000011)
- [27] I. Del Hierro López, J. Polo, N. Martín Chivelet, F. Olivieri, E. Caa-maño-Martín, y L. Olivieri, «Photovoltaic self-sufficiency potential at a district scale in Madrid. A scalable methodology», *Energy Build*, vol. 323, p. 114764, nov. 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114764.
- [28] «Herrajes para cables – Vitec». Accedido: 27 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.sistemasvitec.com/shop/sistema-de-aranas/herrajes-para-cables/herrajes-para-cables/>
- [29] «Onyx Solar, Soluciones de Fotovoltaica Integrada en Edificios». Accedido: 25 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://onyxsolar.es/>



## PROCEDENCIA DE IMÁGENES

[Fig. 01] Imagen tomada de: <https://ftlstudio.com/#; Projects - Building Skins - Under the Sun - 4ª imagen>

[Fig. 02] Imagen tomada de: <https://archello.com/project/volvo-pure-tension-pavilion>

[Fig. 03] Imagen tomada de: <https://archello.com/project/volvo-pure-tension-pavilion>

[Fig. 04] Imagen tomada de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817327184>

[Fig. 05] Imagen tomada de: <https://2025-japan-pavilion.go.jp/en/article/history-latter-part/>

[Fig. 06] Imagen tomada de: <https://www.ackermannarchitekten.com/entry/ueberdachung-des-carports-des-abfallwirtschaftsamts-muenchen/>

[Fig. 07] Imagen tomada de: <https://www.ackermannarchitekten.com/entry/ueberdachung-des-carports-des-abfallwirtschaftsamts-muenchen/>

[Fig. 08] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 09] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 10] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 11] Imagen tomada de: <https://www.archdaily.pe/pe/768466/pabellon-aleman-nil-milan-expo-2015-schmidhuber>

[Fig. 12] Imagen tomada de: <https://www.archdaily.pe/pe/768466/pabellon-aleman-nil-milan-expo-2015-schmidhuber>

[Fig. 13] Imagen tomada de: <https://www.asca.com/applications/projects/opv-sail/>

[Fig. 14] Imagen tomada de: <https://www.paulinevandongen.nl/portfolio/suntex/>

[Fig. 15] Imagen tomada de: <https://jfde.eu/index.php/jfde/article/view/244/243>

[Fig. 16] Imagen tomada de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X25000702?via=ihub#foo65>

[Fig. 17] Imagen tomada de: [https://www.memoriademadrid.es/bus-cador.php?accion=VerFicha&id=23220&num\\_id=20&num\\_total=547](https://www.memoriademadrid.es/bus-cador.php?accion=VerFicha&id=23220&num_id=20&num_total=547)

[Fig. 18] Imagen de elaboración propia, mediante <https://app.shadowmap.org/>

[Fig. 19] Imagen de elaboración propia, mediante <https://app.shadowmap.org/>

[Fig. 20] Imagen de elaboración propia, mediante <https://app.shadowmap.org/>

[Fig. 21] Imagen de elaboración propia, mediante <https://app.shadowmap.org/>

[Fig. 22] Imagen de elaboración propia, mediante <https://app.shadowmap.org/>

[Fig. 23] Imagen de elaboración propia, mediante <https://app.shadowmap.org/>

[Fig. 24] Imagen de elaboración propia, mediante <https://app.shadowmap.org/>

[Fig. 25] Imagen de elaboración propia, mediante <https://app.shadowmap.org/>

[Fig. 26] Imagen de elaboración propia, mediante <https://app.shadowmap.org/>

[Fig. 27] Imagen de elaboración propia, mediante <https://app.shadowmap.org/>

[Fig. 28] Imagen de elaboración propia, mediante <https://app.shadowmap.org/>

[Fig. 29] Imagen tomada de <https://contrataciondelestado.es/>

[Fig. 30] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 31] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 32] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 33] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 34] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 35] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 36] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 37] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 38] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 39] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 40] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 41] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 42] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 43] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 44] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 45] Imagen tomada de : <https://www.sistemasvi-tec.com/shop/sistema-de-aranas/herrajes-para-cables/herrajes-para-cables/#>

[Fig. 46] Imagen tomada de : <https://www.sistemasvi-tec.com/shop/sistema-de-aranas/herrajes-para-cables/herrajes-para-cables/#>

[Fig. 47] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 48] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 49] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 50] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 51] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 52] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 53] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 54] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 55] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 56] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 57] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 58] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 59] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 60] Imagen de elaboración propia.

[Fig. 61] Imagen de elaboración propia.



