

# Diseño e instalación de laboratorio de producción energética fotovoltaica en Pontificia Universidad Católica de Chile

TRABAJO FINAL DE GRADO DEL GRADO DE INGENIERÍA EN  
TECNOLOGIAS INDUSTRIALES



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CHILE



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

AUTOR: Jorge Ribera Esplugues

TUTOR UC: Sergio Eduardo Vera Araya

TUTOR UPV: Ángel Sapena Bañó

CURSO ACADÉMICO: 2021 - 2022

## Sinopsis.

En este proyecto se pretende evaluar la variabilidad de la energía que una instalación solar fotovoltaica produce en función de la inclinación a la que se encuentran los paneles. También se analizará la distancia que hay que dejar entre hileras de paneles, en relación con la inclinación y el espacio usado, y su posible influencia en la variación de producción y rendimiento.

Este estudio hace uso de dos diferentes softwares de simulación (Explorador Solar y System Advisor Model). Evalúa dos tecnologías diferentes de paneles solares fotovoltaicos: policristalina y CIGS (Copper indium gallium selenide), que concede flexibilidad al dispositivo. Finalmente se comparan y analizan los resultados obtenidos.

Teniendo en cuenta lo expuesto, el proyecto abarca el diseño y la instalación de una planta energética de placas solares fotovoltaicas en una azotea ubicada en el campus San Joaquín de la Pontificia Universidad Católica de Chile, este será un laboratorio destinado a la investigación sobre el efecto que la inclinación, distancia y tipos de paneles solares tienen en el rendimiento y en la producción energética fotovoltaica en una localización concreta.

## Palabras clave

Energía solar fotovoltaica, inclinación, distancia entre paneles, sombras, BIM, instalaciones eléctricas.

## Summary

This project aims to evaluate the variability of the energy that a photovoltaic solar installation produces depending on the inclination of the panels. The distance to be left between rows of panels will also be analyzed, in relation to the inclination and the space used, and its possible influence on the variation of production and performance.

This study will be carried out using two different simulation software (Solar Explorer and System Advisor Model). It evaluates two different photovoltaic solar panel technologies: polycrystalline and CIGS (Copper indium gallium selenide), which gives flexibility to the device. Finally, the results obtained are compared and analyzed.

Considering the above, the project encompasses the design and installation of a photovoltaic solar panel energy plant on a rooftop located on the San Joaquín campus of the Pontificia Universidad Católica of Chile, this will be a laboratory for research on the effect that the inclination, distance, and types of solar panels have on the performance and photovoltaic energy production in a specific location.

## Key words

Photovoltaic energy, inclination, distance between panels, shadows, electric installations.

## Índice.

### Documentos contenidos en el proyecto.

- Documento 1: Memoria descriptiva.
- Documento 2: Planos

### Documento 1: Memoria descriptiva

1.	Introducción .....	7
1.1.	Paneles solares fotovoltaicos.....	8
2.	Objetivos .....	13
3.	Simulación y análisis de las variaciones energéticas determinadas por la inclinación de los dispositivos de captación. ....	15
3.1.	Objetivos de las simulaciones. ....	15
3.2.	Consideraciones Previas.....	15
3.2.1.	Materiales y equipos eléctricos.....	15
3.2.2.	Factor de pérdidas de la instalación.....	17
3.2.3.	Localización geográfica.....	17
3.2.4.	Cálculo y diseño de los ángulos de inclinación a estudiar.....	18
3.2.5.	Ocupación del suelo para cada orientación y cálculo de los factores de empaquetamiento.....	20
3.2.6.	Softwares utilizados. ....	23
3.3.	Resultados .....	23
3.3.1.	Resultados Software <i>Explorador Solar</i> .....	23
3.3.2.	Resultados Software <i>System Advisor Model</i> .....	26
3.3.3.	Análisis de los resultados .....	28
3.3.4.	Generación energética teniendo en cuenta la ocupación del espacio. ....	35
4.	Diseño de laboratorio de producción energética solar fotovoltaica en azotea de edificio IMA.41	
4.1.	Finalidad de la instalación.....	41
4.2.	Diseño de la instalación.....	41
4.2.1.	Disposición de los paneles. ....	41
4.2.2.	Efecto de las sombras.....	42
4.2.3.	Disposición de los inversores y cuadro eléctrico. ....	43
4.2.4.	Medición de variables. ....	43
4.2.5.	Distribución de los conductos eléctricos.....	44

---

4.2.6.	Cableado.....	44
4.2.7.	Conexiones.....	45
4.2.8.	Seguridad.....	46
5.	Diseño de y metodología de recogida de datos.....	47
5.1.	Finalidad.....	47
5.2.	Cálculo de los ángulos de estudio.....	47
5.3.	Determinación temporal de las posiciones.....	48
5.4.	Frecuencia de muestreo.....	50
5.5.	Mantenimiento y limpieza.....	50
6.	Conclusión.....	51
7.	Bibliografía.....	53

## Documento 2: Planos

Orientación edificio IMA.....	55
Disposición de laboratorio en azotea IMA.....	56
Alzado laboratorio en azotea IMA.....	57
Planta laboratorio en azotea IMA.....	58
Perfil izquierdo laboratorio en azotea IMA.....	59
Vista sala laboratorio en azotea IMA.....	60
Efecto sombras 21 de junio a las 8:30h.....	61
Efecto sombras 21 de junio a las 12:45h.....	62
Efecto sombras 21 de junio a las 17:15h.....	63
Diagrama eléctrico unifilar de la instalación.....	64

# DOCUMENTO I

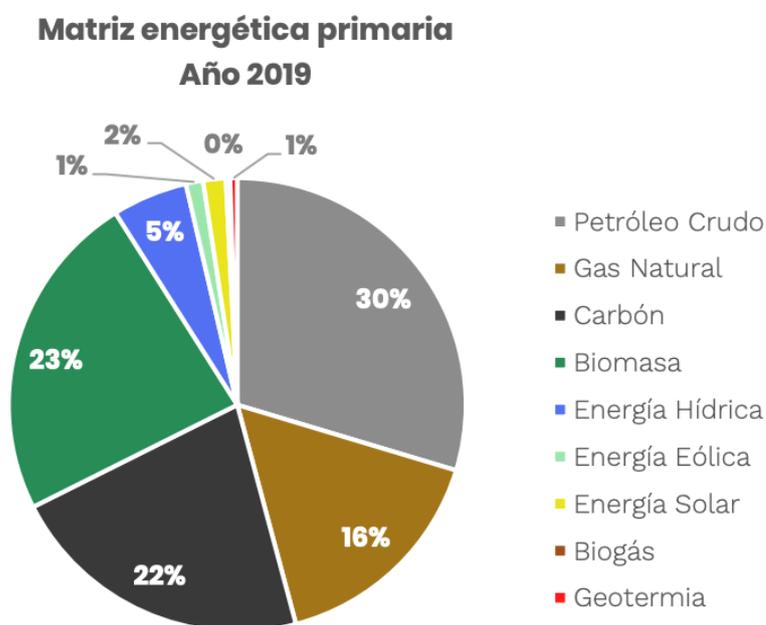
## Memoria Descriptiva

## 1. Introducción

La electricidad es la fuente de energía secundaria más común en los hogares de la mayoría de los países. Es fácil de transportar y la podemos convertir en otros muchos tipos de energía: cinética, térmica o lumínica.

Los orígenes de la energía son diversos, en el caso de Chile, la denominada matriz eléctrica en 2021 contaba con un 53,3% de la producción energética instalada mediante fuentes de energía renovable y un 46,7% mediante fuentes no renovables. Si ponemos el foco en las renovables instaladas, podemos observar que un 45% proviene de energía hidráulica, un 33,4% de la energía solar, un 18,6% de la eólica y el 3% restante de otras fuentes minoritarias como la geotérmica o el uso de la biomasa. Finalmente, si observamos la generación bruta de energía eléctrica mediante fuentes renovables contrastamos que, en el mismo año, esta supuso un total de 19.383 GWh de 47.128 GWh totales, o, en otras palabras, un 41,1% del total, dejando el 58,9% restante en manos de los recursos fósiles.<sup>1</sup>

En Chile, además, en este mismo periodo, el 68% de la energía primaria provino de fuentes de energía fósil, como el petróleo crudo, carbón mineral y gas natural, siendo el 32% restante de origen renovable donde la mayor participación, en concreto un 71,9% de la energía renovable, proviene de la biomasa y el 28,1% restante de otras fuentes de energía las que están libres de emisiones de CO<sub>2</sub> o, en otras palabras, únicamente el 9% de la energía primaria consumida en el país no emite CO<sub>2</sub> u otros gases de efecto invernadero a la atmósfera.



**Figura 1.** Matriz energética primaria en Chile, año 2019.<sup>1</sup>

Debido a los recientes cambios del paradigma energético como puede ser el uso de dispositivos chiller - bomba de calor en sistemas de climatización o la electrificación del parque móvil, mucha

de la energía secundaria que no es electricidad va a pasar a serlo, generando así la necesidad de sustituir el uso de combustibles por energía eléctrica que ha de ser producida.

Para un desarrollo sostenible, enmarcado en los *Objetivos de Desarrollo Sostenible* de la conocida como *Agenda 2030*, esta nueva energía eléctrica que hemos de producir y la que se produce actualmente mediante uso de combustibles fósiles deberán ser sustituidas por otras fuentes de energía que no emitan CO<sub>2</sub> y otros gases contaminantes o de efecto invernadero a la atmósfera.

Es por esto y por el bajo coste de explotación que el desarrollo e instalación de fuentes de energía renovables se ha visto altamente incrementado en los últimos 15 años en los países más desarrollados. La tecnología se ha visto adaptada a menor escala llegando a ser posible instalar pequeñas centrales de generación de energía solar fotovoltaica, solar térmica, eólica e incluso aplicaciones de energía geotérmica a nivel de industrias, comunidades, vecindarios o directamente usuarios.

Esta nueva forma de generación ayuda a la descentralización de la producción energética, a la participación ciudadana en el mercado de la energía y a un incremento de la producción de energía verde siendo muy común encontrar pequeñas centrales de autoproducción energética mediante paneles solares o turbinas eólicas en muchas industrias, edificios comunales o casas unifamiliares de diversos tipos, en diversos países desarrollados a lo largo del planeta.

### 1.1. Paneles solares fotovoltaicos.

Los paneles solares fotovoltaicos se llevan estudiando desde la década de 1950. Se tratan de dispositivos físico-eléctricos encargados de generar corriente a través de la radiación solar incidente sobre estos, principalmente, mediante uniones PN basadas en silicio. Para ello, ya desde su origen, hacen uso del efecto fotoeléctrico, el cual fue descubierto por el físico alemán Edmond Becquerel en 1839 mientras realizaba experimentos con una celda electrolítica compuesta por dos electrodos metálicos: la conclusión fue que algunos materiales, en particular el platino, producía pequeñas cantidades de corriente eléctrica cuando se exponía a los rayos del sol.

En 1873, el ingeniero británico Willoughby Smith descubrió la fotoconductividad del selenio (este elemento varió su conductividad eléctrica dependiendo de la iluminación de la superficie). Diez años después, Carlos Fritts inventó la primera celda solar utilizando selenio, que mostró una eficiencia del 1%, resultando así demasiado baja para aplicaciones prácticas.<sup>2</sup>

Fue necesario esperar hasta 1941 para que se produjeran las primeras celdas de Silicio de la mano de Russel Ohl, las cuales eran mucho mejores que las de selenio y llegaron, a los pocos años, a obtener eficiencias de conversión energética de un 15%. Cabe destacar que las celdas producidas con silicio han sido capaces de mantenerse en el mercado hasta la actualidad.<sup>2</sup>

Volviendo al efecto fotoeléctrico, este efecto explica que los fotones son capaces de entregar energía a los electrones en función de la longitud de onda de los fotones, resultando más energéticos cuando la longitud de onda es más corta o, lo que es lo mismo, cuando la frecuencia es mayor.

El efecto anterior permite transformar tanto la radiación directa como la difusa que impacta sobre una determinada superficie en una corriente eléctrica continua. Para esto, los materiales más adecuados hasta el momento y por los cuales están formadas las celdas solares actualmente son los semiconductores, en especial el más común es el Silicio, aunque, debido a nuevos paradigmas más responsables ecológicamente, están apareciendo en la actualidad tecnologías basadas en compuestos orgánicos en busca de salvar los inconvenientes causados por la toxicidad del silicio si este se ve liberado al ambiente.

La construcción de una celda fotovoltaica común se realiza mediante placas de silicio en disposición atómica monocristalina, policristalina o amorfa y, a su vez, aditivadas con otros elementos de tipo P (como el boro), los cuales tienen menos electrones en su capa de valencia y generan huecos en el conjunto final y de tipo N (como el fósforo), los cuales tienen electrones extra en esta capa de valencia, generando una saturación de electrones mediante electrones libres.

Las celdas solares están formadas por la unión de 1 lámina de silicio tipo N muy delgada y dopada situada en la parte superior, donde incide la luz, y una lámina de Silicio tipo P mucho más ancha y menos dopada situada en la parte inferior. Esta unión produce una región de agotamiento entre estas dos láminas ya que los electrones libres de la lámina N se desplazan a los huecos de la lámina tipo P generando así un diodo. Como los elementos que forman la lámina tipo N han cedido parte de estos a los huecos de la región P, los elementos tipo N ahí dispuestos pasan a tener carga positiva y generan un campo eléctrico positivo en el límite de la región de agotamiento, de manera inversa, como los elementos tipo P han visto llenados sus huecos por electrones, esta área se ve cargada negativamente. Esto se ve definido esquemáticamente en el gráfico 2.



**Figura 2.** Esquema unión PN con región de agotamiento.

Si energía en forma de radiación incide en esta región, se generan pares hueco-electrón debido al efecto fotoeléctrico previamente mencionado, ascendiendo los electrones a la parte N atraídos por la carga positiva de esta y los huecos, por este mismo principio, descienden a la parte con dopaje del tipo P. Este movimiento de electrones y huecos genera una diferencia de potencial de forma que, en caso de conectar una carga entre las dos láminas, obtendríamos un flujo eléctrico o corriente continua y, por ende, energía eléctrica.<sup>3</sup>

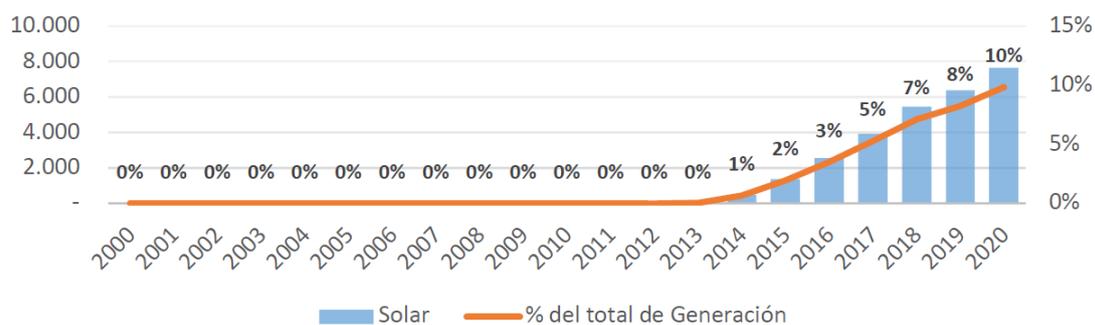
Como cada celda genera muy poco potencial, alrededor de 600 mV, es necesario disponer de varias de estas conectadas en serie para poder alcanzar valores entre 12V y 48V, aptos para las aplicaciones que se requieren. Esta asociación en serie se conoce como submódulos, la unión de submódulos en paralelo aumenta la corriente eléctrica que entrega el panel confiriendo así el módulo completo. Finalmente, el módulo se ensambla en una estructura que proteja a este de los agentes meteorológicos.<sup>3</sup>

Una instalación de producción solar fotovoltaica puede ser de diversas formas, si focalizamos en las instalaciones diseñadas para edificios, encontramos centrales con potencias en KW. En ocasiones estas permiten acumulación mediante baterías (llegando a poder ser de total autoconsumo y estar aisladas de la red de distribución), o que no cuentan con este sistema y vuelcan toda la energía producida a la red de la casa. Actualmente, la energía producida que no se consume por el usuario, se vende a la red eléctrica encargada de distribuir públicamente la energía. Además de los paneles, en una instalación siempre encontraremos el dispositivo denominado inversor, el cual es el encargado de recibir energía en forma de corriente continua y transformar a esta en corriente alterna, de las mismas características de la red eléctrica a la que se quiere volcar la energía producida por la instalación. Finalmente, los paneles se conectan entre ellos mediante cables y conexiones los cuales presentan caídas de voltaje por el efecto Joule.

Por otro lado, las grandes centrales de producción solar fotovoltaica suelen contar con potencias de producción en MW necesitando así una gran cantidad de paneles y extensiones de terreno. Una vez producida la energía, esta se vierte a la red en forma de alta tensión mediante el uso de transformadores, para así poder distribuirla de manera que las pérdidas sean menores en el transporte.

Debido a la más reciente producción a gran escala de paneles solares y componentes como los anteriormente mencionados en países del sudeste asiático, sobre todo en China, esta tecnología se ha vuelto mucho más asequible que en sus inicios, manteniendo unos estándares de normalización, fiabilidad y simplicidad a nivel de usuario muy altos. Todos estos factores han ayudado a que los paneles solares fotovoltaicos sean la tecnología más usual de cara a la instalación de centrales de autoconsumo y producción energética a pequeña escala.

Junto con esta producción de autoconsumo, se ha experimentado un gran crecimiento a nivel de producción mediante grandes centrales de producción energética solar, tanto fotovoltaica como térmica. En el siguiente gráfico podemos observar el alto crecimiento de producción energética solar que se ha experimentado en Chile en el periodo entre 2013, donde la instalación de esta tecnología era apenas existente, y 2020, año en el cual supone un 10% de la energía eléctrica producida en el país.



**Figura 3.** Generación de electricidad en base a energía solar [GWh], 2000 – 2020.<sup>1</sup>

Cabe destacar que los paneles solares fotovoltaicos no están exentos de inconvenientes. Uno de ellos es la dificultad de encontrar el lugar adecuado para su instalación, ya que el efecto de una pequeña sombra sobre un panel disminuye significativamente el rendimiento de este debido a que la celda que se encuentra sombreada pasa a tener un voltaje negativo, hecho que genera que esta no conduzca electricidad debido al comportamiento de diodo y que puede afectar a las demás celdas que se encuentran en serie. Afortunadamente, los paneles solares actuales tienen métodos que evitan que toda la instalación se vea influenciada o inutilizada debido a una sombra en una celda de la instalación. Esto se consigue mediante diodos situados en paralelo cada cierto número de celdas y que permite la corriente conduzca por estos en el caso de que alguna celda se encuentre sombreada. Aun así, este factor no evita que el funcionamiento de los paneles se vea perjudicado debido a las conexiones serie-paralelo mediante las cuales se construyen los dispositivos y la instalación.<sup>4 5</sup>

Las conexiones entre paneles solo deben realizarse con paneles de el mismo modelo y, por ende, de la misma tecnología y especificaciones técnicas, ya que las asociaciones serie-paralelo en las cuales se diseñan las plantaciones de producción terminarían haciendo que los paneles solares no trabajen en su punto de máximo rendimiento y viendo comprometida la eficiencia de la instalación.

Por otro lado, la instalación masiva de paneles solares compite con la producción de otros recursos como puede ser la agricultura, la ganadería o la explotación forestal, ya que espacios que anteriormente eran usados para estos fines pasan a estar ocupados por centrales de producción solar, que, debido a la alta demanda energética proveniente de fuentes renovables, cada vez son más comunes y extensas.

Dichas instalaciones se suelen situar en zonas rurales donde el precio del terreno es mucho menor que cerca de las ciudades, generando en ocasiones un gran impacto paisajístico y visual en las poblaciones cercanas, y una disminución de los productos agrícolas que estas pueden producir. Se suma, además, el impacto y el terreno ocupado por los tendidos eléctricos necesarios para transportar la energía. Barreras para animales y pérdida de la eficiencia energética.

Para reducir en medida de lo posible estos inconvenientes, una posible solución es producir gran parte de la energía solar fotovoltaica en los tejados de los edificios, requiriendo de esta forma una menor cantidad de energía producida en grandes centrales, ya sean solares, eólicas o que funcionen mediante la quema de combustibles fósiles.

Enmarcado en la producción de energía mediante paneles solares fotovoltaicos, se están realizando multitud de estudios alrededor de todo el planeta, siendo lo más común en estos estudiar el efecto de las sombras en la producción energética, es necesario pues analizar las diversas tecnologías que podemos encontrar y sus beneficios e inconvenientes y, por último, profundizar en el efecto de la inclinación de los paneles en la producción energética.

Para todas las localizaciones existe una inclinación que resulta ser la más adecuada para maximizar la producción por panel, existiendo multitud de estudios que modelizan, mediante fórmulas muy simples, cual es la mejor inclinación para todo el año o para los meses de verano o invierno en función de las necesidades energéticas para las que se diseña la instalación. Se busca maximizar *la* producción energética que puede ofrecer el panel en cierto periodo del año, como puede ser un mes, una estación o un año completo.<sup>6</sup>

Generalmente, en el hemisferio sur los paneles se orientan hacia el norte ( $0^\circ$ ), ya que es la orientación en que obtenemos más horas de luz solar durante todo el día, siendo justo lo contrario en los lugares del hemisferio norte, dónde los paneles se orientan hacia el sur ( $180^\circ$ ) por esta misma razón.

## 2. Objetivos

El presente proyecto pretende evaluar la variación de la producción energética en función de la inclinación del panel sobre el plano horizontal dónde se sitúa. Para esto, se realizarán simulaciones mediante el uso de dos diferentes softwares que, entre sus diversas funciones, permiten el estudio y viabilidad de instalaciones de paneles solares fotovoltaicos. Estos dos software en cuestión son la web del *Ministerio de Energía de Chile* conocida como *Explorador Solar* a que se puede acceder desde el siguiente enlace: <https://solar.minenergia.cl/exploracion> y *System Advisor Model (SAM)* del organismo estadounidense *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* que permite simulaciones con más factores que el anterior y estudiar el funcionamiento de diversas tecnologías y variables a la vez, como en nuestro caso la inclinación.

Con los datos obtenidos se evalúa y modela como será el funcionamiento de los paneles solares para cada inclinación en función del mes del año en estudio. Obteniendo así modelos que nos permitan definir las inclinaciones óptimas y poder sacar el mayor partido posible a nuestra instalación de paneles solares fotovoltaicos, valorando las demandas energéticas a la que esta esté asociada para los diferentes meses del año y, finalmente, poder definir las mejores inclinaciones para obtener la mayor cantidad de energía durante un determinado periodo; como puede ser un mes, una estación o el año completo.

También se pretende evaluar el efecto de la distancia entre paneles como variable limitante en la producción de energía en espacios definidos o acotados, sabiendo que a mayor inclinación, la distancia entre paneles ha de ser también mayor para evitar sombras en las filas que se dispongan posteriormente, y observar si, uniendo estos dos parámetros de producción y distancia entre paneles, se puede llegar a una mayor producción de energía eléctrica en el mismo espacio.

Una vez establecido el estudio y simulación del proyecto es necesario comprobar los valores reales de producción solar fotovoltaica para lo que hace falta generar un laboratorio real. La instalación del laboratorio se establece en la azotea del edificio *IMA* situado en el campus *San Joaquín* de la *Pontificia Universidad Católica de Chile*, en la comuna de Macul de la Región Metropolitana de Chile y, mediante su uso, se pretende estudiar dos diferentes tecnologías de panel solar, por un lado, paneles solares de configuración policristalina y, por otro lado, paneles con celdas de tecnología CIGS, las cuales confieren características flexibles al panel.

Se requiere estudiar los dos tipos de paneles por separado para poder evaluar las diferencias entre sus tecnologías, que facilitará conocer con detalle las características de sus funcionamientos, sus potencias y las variaciones debidas a la inclinación.

El diseño se realizará mediante software BIM, evitando así interferencias con otras especialidades que ya se encuentran instaladas en el mismo edificio.

Como la universidad ya dispone de diferentes materiales para esta instalación, el diseño se adaptará al uso de los materiales disponibles y realizará la adquisición de los que falten a través de empresas externas.

Finalmente, junto con la ayuda de una empresa externa, el laboratorio se construirá y se pondrá en funcionamiento.

El objeto del proyecto se ha abordado dividiendo este en los siguientes objetivos específicos:

- Simulación y análisis de las variaciones energéticas determinadas por la inclinación de los dispositivos de captación y la distancia entre estos.
- Diseño e instalación de Laboratorio Solar Fotovoltaico en la azotea del edificio IMA en el campus San Joaquín que permita el estudio de la variación de la energía producida por los paneles en función de la inclinación de estos.
- Diseño de metodología de recogida de información.

### 3. Simulación y análisis de las variaciones energéticas determinadas por la inclinación de los dispositivos de captación.

#### 3.1. Objetivos de las simulaciones.

En este capítulo vamos a realizar las simulaciones mediante el uso de los softwares *Explorador Solar* y *System Advisor Model*.

Una vez generados los resultados analizaremos la variación de la producción energética en función de los valores de inclinación a las que se encuentran nuestros paneles solares, escalaremos este estudio partiendo desde los meses hasta la producción anual.

Además, analizaremos las variaciones que se observen entre las dos tecnologías y los dos softwares utilizados mediante una comparación de los resultados obtenidos.

Finalmente, estudiaremos el factor de la ocupación del suelo para los diferentes casos de inclinación que se han estudiado, visualizando así las posibles opciones que nos permitan obtener una mayor producción energética teniendo en un espacio limitado mediante la disposición de mayor número de paneles.

#### 3.2. Consideraciones Previas.

Para el estudio mediante simulaciones de nuestras instalaciones hemos tenido en cuenta previamente diferentes factores.

Estos son los materiales y dispositivos eléctricos, los softwares empleados, la localización y emplazamiento de la instalación, el % de pérdidas, el diseño de los ángulos de estudio y la distancia que se ha de dejar entre filas de paneles.

##### 3.2.1. Materiales y equipos eléctricos.

En este apartado se detallan los paneles solares y el inversor con los que contamos previamente al estudio y con los cuales vamos a realizar las simulaciones. Posteriormente estos se incluyen en el diseño y la instalación de nuestra instalación solar fotovoltaica.

##### *Paneles CanadianSolar CS6U-325P*

Para el estudio, se cuentan con 5 paneles con tecnología policristalina de la marca *CanadianSolar* modelo *CS6U-325P* los cuales cuentan con las siguientes especificaciones.<sup>7</sup>

$$P_{max} = 325W$$

$$V_{mp} = 37V$$

$$I_{mp} = 8,78A$$

$$V_{oc} = 45,5V$$

$$I_{sc} = 9,34A$$

$$\varepsilon = 16,72\%$$

$$T_{coef} V_{oc} = -0,31\%/K$$

$$T_{coef} I_{sc} = 0,053\%/K$$

$$T_{coef} V_{oc} = -0,41\%/K$$

$$T^{\circ} nom = 45^{\circ}C$$

$$N^{\circ} celdas = 72$$

#### *Paneles MiaSolé Flex-02 380W*

Se cuentan con 4 paneles con tecnología CIGS de la marca *MiaSolé* y modelo *Flex-02 380W* los cuales cuentan con las siguientes características:<sup>8</sup>

$$P_{max} = 380W$$

$$V_{mp} = 31,5V$$

$$I_{mp} = 12,06A$$

$$V_{oc} = 39V$$

$$I_{sc} = 13,58A$$

$$\varepsilon = 16,6\%$$

$$T_{coef} V_{oc} = -0,28\%/K$$

$$T_{coef} I_{sc} = 0,008\%/K$$

$$T_{coef} V_{oc} = -0,38\%/K$$

$$T^{\circ} nom = 48^{\circ}C$$

$$N^{\circ} celdas = 168$$

#### *Inversor SMA SunnyBoy 1.5*

Se dispone de un Inversor de la marca SMA modelo comercial *SunnyBoy 1.5* que tiene las siguientes características técnicas.<sup>9</sup>

$$P_{max} AC = 1500W$$

$$V AC = 220V$$

$$\text{Min } V_{DC} = 160V$$

$$V_{\text{nominal}} = 360V$$

$$\text{Max } V_{DC} = 500$$

$$\varepsilon = 96.1\%$$

$$P_{\text{noche}} = 2W$$

### 3.2.2. Factor de pérdidas de la instalación.

Además de las características de los materiales mencionados anteriormente, en la simulación de las instalaciones se tiene en cuenta un determinado porcentaje de pérdidas por las conexiones, suciedad sobre los paneles y efecto resistivo de los cables. Este valor suele variar entre un 5% y un 20% pero es francamente complejo de calcular previamente a la instalación debido a los muchos factores que se deben tener en cuenta. Es por esto por lo que se pidió opinión al ingeniero Felipe Andrés Tori Kendall para obtenerlo, concluyendo esta consulta con el valor de un 10% como una solución adecuada para usar en simulaciones.

### 3.2.3. Localización geográfica.

La localización que se ha tomado para la posterior instalación del laboratorio se encuentra en la azotea del edificio IMA, es por esto por lo que todas las simulaciones se llevarán a cabo tomando las coordenadas de este lugar.

El conocimiento exacto de la localización se requiere para obtener los archivos que modelizan las características climáticas que se dan en esta. Para ello se ha tomado la siguiente localización geográfica:

$$\text{Latitud} = 33,49807 S$$

$$\text{Longitud} = 70,60682 O$$



**Figura 4.** Localización del Edificio IMA dentro del campus San Joaquín de la PUC de Chile.

Es importante destacar que la azotea del edificio no se ve influenciada por sombras provenientes de otros edificios o árboles que se encuentren de forma aledaña. En el caso de que esto se hubiese dado lo deberíamos tener en cuenta mediante un incremento del % de pérdidas.

#### 3.2.4. Cálculo y diseño de los ángulos de inclinación a estudiar.

Para este cálculo es importante saber la latitud a la que se encuentra la instalación, ya que esta, junto con la inclinación del eje terrestre, influye de manera directa en la inclinación de los rayos de sol sobre el plano horizontal donde se encontrará la instalación.

En los equinoccios de primavera y otoño, los rayos solares impactan la tierra con la inclinación definida como:

$$\alpha = 90 - L^{10}$$

Donde  $L$  es nuestro valor de latitud geográfica. Obteniendo de esta forma que dichos días, la inclinación de los paneles que nos confiere un valor normal es:

$$\beta = 90 - \alpha^{10}$$

O, despejando de la anterior ecuación:

$$\beta = L$$

Es por esto por lo que en muchas instalaciones se sitúan los paneles con esta orientación.

Por otro lado, en los solsticios de verano, los rayos solares llegan a la superficie siguiendo la siguiente ecuación:

$$\alpha = 90 - L - 23,5^{10}$$

Donde el valor 23,5 se refiere al ángulo aproximado de la inclinación del eje de la tierra.

Como en el caso anterior:

$$\beta = L - 23,5^{10}$$

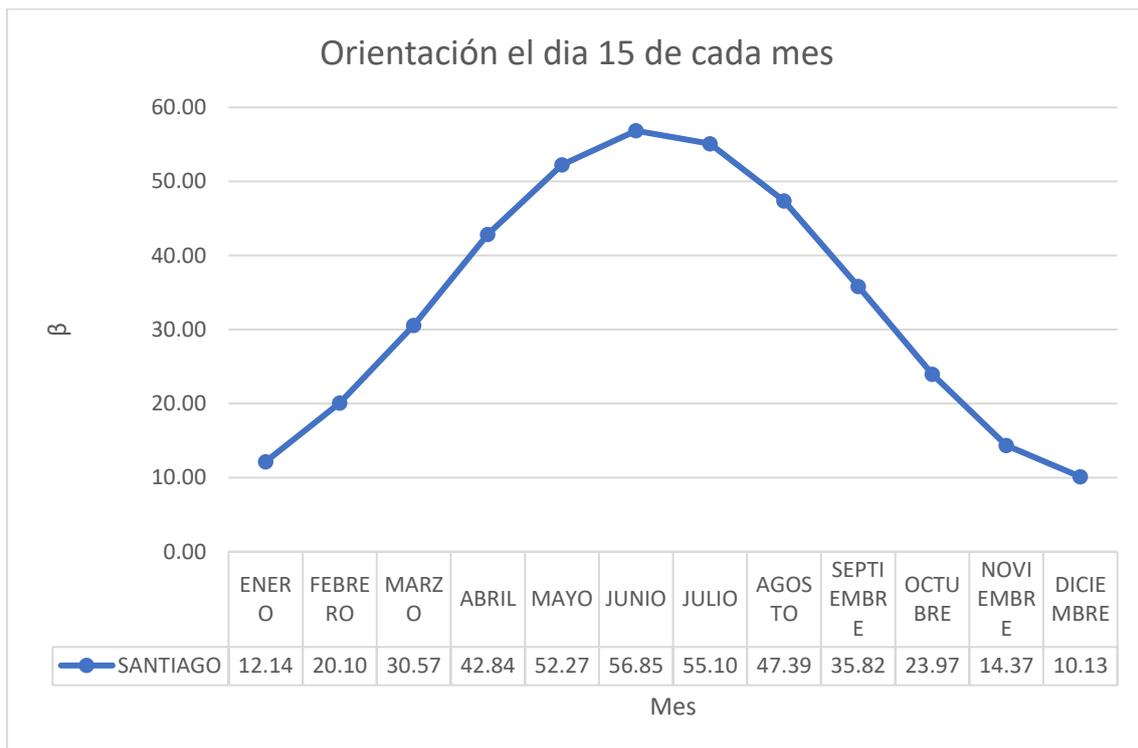
Opuestamente al caso de verano, para el solsticio de invierno, el valor de la inclinación de los paneles que resulta normal a los rayos solares será:

$$\beta = L + 23,5^{10}$$

Teniendo todo esto en cuenta, y considerando la órbita terrestre como una circunferencia se puede obtener el valor de la inclinación normal a los rayos solares el día 15 de cada mes mediante una función sinusoidal. Tomaremos este como punto teórico en el cual la producción ha de ser la mayor durante dicho mes y comprobaremos la veracidad de esta suposición.

Para el caso de nuestra instalación obtenemos los siguientes valores de inclinación normal a los rayos solares el día 15 de cada mes:

Latitud Santiago:  $L = 33,5^{\circ} S$



**Figura 5.** Ángulo normal a los rayos solares el día 15 de cada mes.

Además de estos ángulos se estudiarán otros ángulos que nos permitan observar el funcionamiento de los paneles un poco más ampliamente, entre ellos se encuentra el óptimo para la producción anual, el cual se obtuvo a través de la opción del software *Explorador Solar* encargada de calcular este. Estos puntos extra son:

$$\beta = 0^\circ$$

$$\beta = 5^\circ$$

$$\beta = 26^\circ \text{ (óptimo)}$$

$$\beta = 60^\circ$$

$$\beta = 75^\circ$$

$$\beta = 90^\circ$$

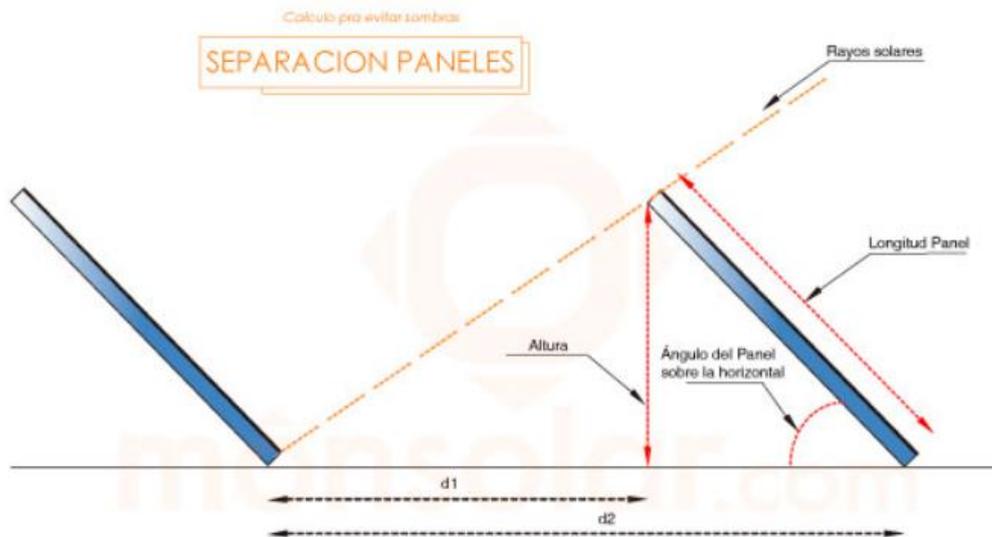
### 3.2.5. Ocupación del suelo para cada orientación y cálculo de los factores de empaquetamiento.

Como hemos mencionado anteriormente, el hecho de escoger una inclinación u otra para cada panel determina una distancia que se requiere dejar entre los paneles solares que se dispongan en filas posteriores. Para incluir este hecho en los cálculos y poder observar la ocupación como un factor para tener en cuenta en el momento de diseñar una instalación, hemos calculado un factor de empaquetamiento lineal de los paneles sobre el plano donde van a ser instalados, el cual, tomando el punto 0 como referencia, obteniendo así el valor 1, determina la cantidad de paneles que podemos incorporar en el mismo espacio (considerando un número indefinido de filas de paneles) de forma teórica en función de la inclinación. Los resultados obtenidos se han tomado siguiendo las siguientes ecuaciones.<sup>11 5</sup>

$$d1 = \frac{h * \text{sen}(\beta)}{\tan(61 - \text{Latitud})}$$

$$d2 = d1 + h * \cos(\beta)$$

En nuestro caso, con la finalidad de normalizar los valores hemos tomado el valor de longitud del panel ( $h$ ) como 1, de esta forma  $d2$  será 1 para el caso de  $0^\circ$  y los demás valores serán mayores. A su vez, obtendremos valores fácilmente escalables para otros valores de longitud del panel ya que solo tendremos que multiplicar por la longitud de panel los valores de  $d1$  o de  $d2$  debido a que el 1 es el valor neutro de la multiplicación.



**Figura 6.** Esquema explicativo de las distancias entre paneles.<sup>11</sup>

Finalmente se ha calculado el factor de empaquetamiento como el resultado del siguiente cálculo:

$$fel = \frac{d2(0^\circ)}{d2(\beta)}$$

Obteniendo así el valor que nos determina el número de filas de paneles que podemos situar en el mismo espacio que ocuparían cierto número de filas de paneles situadas a 0°.

Finalmente, como uno de los objetivos del estudio es observar si en la misma área se puede obtener un mayor valor de energía situando los paneles a una orientación diferente a la de óptima producción, se toma este valor como referencia y se calcula un  $fel'$  que determina cuantas placas más se pueden situar en el espacio que ocupan las placas a 26° de la siguiente manera:

$$fel' = \frac{d2(\beta)}{d2(26^\circ)}$$

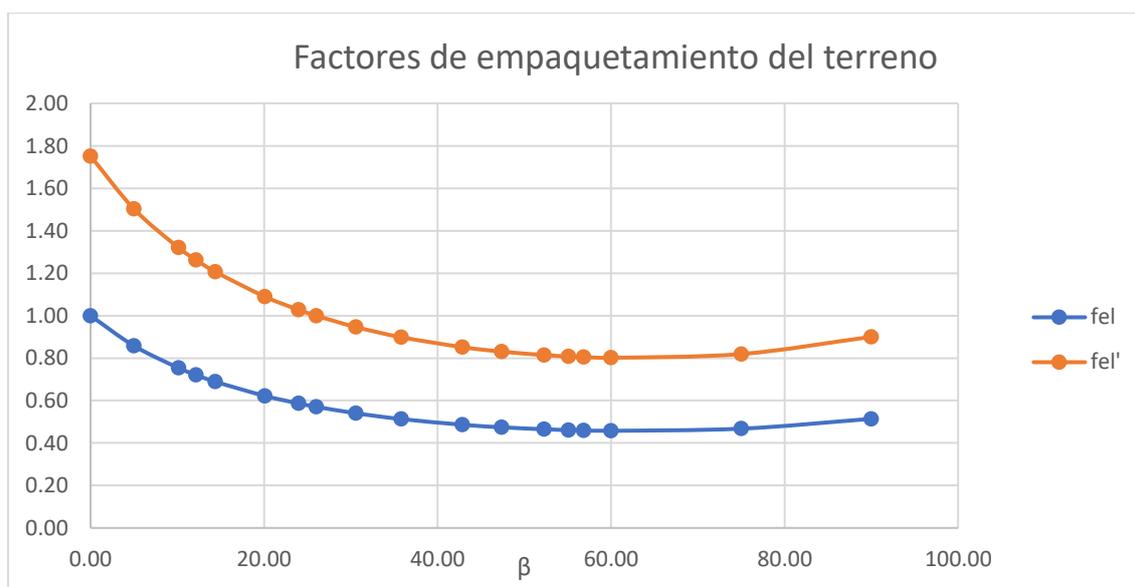
$\beta$	$\text{sen}(\beta)$	$\text{cos}(\beta)$	d1	d2	Fel (0°)	fel' (26°)
0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.75
5.00	0.09	1.00	0.17	1.17	0.86	1.50
10.13	0.18	0.98	0.34	1.33	0.75	1.32
12.14	0.21	0.98	0.41	1.39	0.72	1.26
14.37	0.25	0.97	0.48	1.45	0.69	1.21
20.10	0.34	0.94	0.67	1.61	0.62	1.09
23.97	0.41	0.91	0.79	1.70	0.59	1.03
26.00	0.44	0.90	0.85	1.75	0.57	1.00
30.57	0.51	0.86	0.99	1.85	0.54	0.95
35.82	0.59	0.81	1.14	1.95	0.51	0.90

42.84	0.68	0.73	1.32	2.06	0.49	0.85
47.39	0.74	0.68	1.43	2.11	0.47	0.83
52.27	0.79	0.61	1.54	2.15	0.46	0.81
55.10	0.82	0.57	1.60	2.17	0.46	0.81
56.85	0.84	0.55	1.63	2.18	0.46	0.81
60.00	0.87	0.50	1.69	2.19	0.46	0.80
75.00	0.97	0.26	1.88	2.14	0.47	0.82
90.00	1.00	0.00	1.95	1.95	0.51	0.90

**Tabla 1.** Cálculo de factor de empaquetamientos en función de la inclinación de los paneles.

En esta tabla se observa como los valores para el factor de empaquetamiento y el factor de empaquetamiento prima disminuyen cuando la orientación se ve incrementada.

Para observar esto de manera más gráfica se dispone del siguiente gráfico:



**Figura 7.** Representación gráfica de los factores de empaquetamiento.

Se observa que ambos factores representan lo mismo, pero en el caso del *fel*, la referencia está tomada sobre el punto de  $0^\circ$  y en el caso del *fel'* esta se toma desde el punto de  $26^\circ$ .

Con el factor de empaquetamiento también podemos determinar el número de filas que podemos incluir en un cierto espacio siguiendo la siguiente ecuación:

$$F = \frac{l(m)}{h(m)} * fel$$

Siendo  $l$  la longitud del espacio que se dispone,  $h$  la dimensión del panel en función de cómo esté instalado tomando siempre causante de la sombra detrás de nuestro panel y  $F$  el número total de filas que se puede obtener en ese espacio dado.

Ejemplo:

$$\beta = 26^\circ \rightarrow fel = 0,57$$

$$l = 150m$$

$$h = 2m$$

$$F = \frac{150m}{2m} * 0,57 = 42,75 \rightarrow 42 \text{ filas}$$

### 3.2.6. Softwares utilizados.

En el estudio de los paneles solares hemos utilizado dos softwares diferentes. De esta forma se puede obtener un abanico de datos más amplio.

Los dos softwares escogidos son *Explorador Solar* y *System Advisor Model*.

El software *Explorador Solar* se trata de una web de acceso público del Ministerio de Energía del gobierno de Chile. Este software se puede encontrar en la siguiente web <https://solar.minenergia.cl/>. Se trata de un conjunto de herramientas en línea destinadas al análisis de los recursos renovables que permiten, de manera gráfica, realizar una evaluación preliminar del potencial energético sobre cualquier sitio definido por el usuario, aunque no sustituye mediciones en terreno.

Entre las herramientas disponibles se encuentra el cálculo de sistemas de producción fotovoltaicos. Para este estudio se ha hecho uso de modelo de generación monofacial modelo avanzado.

El software *System Advisor Model (SAM)* se trata de un instalable gratuito desarrollado por el departamento de energía de los Estados Unidos, en concreto por la agencia *National Renewable Energy Laboratory*. Al igual que en el caso de *Explorador Solar*, este software consiste en un conjunto de herramientas que permita analizar el desempeño y viabilidad económica de diferentes tecnologías mediante simulaciones y modelos financieros. Entre las disponibles se encuentra el estudio de instalaciones de paneles solares.

El uso de *SAM* requiere un conocimiento más a fondo de los dispositivos ya que las variables a introducir en este software son mayores.

## 3.3. Resultados

### 3.3.1. Resultados Software *Explorador Solar*.

En este apartado se van a estudiar los diversos resultados obtenidos de las simulaciones que se han realizado con el software del Ministerio de Energía del gobierno del Chile conocido como *Explorador Solar*. Este tiene un apartado de cálculo de generación eléctrica mediante paneles solares fotovoltaicos donde se ha de introducir la localización de emplazamiento, los datos de los paneles e inversor a estudiar y el porcentaje de pérdidas. De esta forma se han realizado las simulaciones para cada caso de orientación y tecnología de panel solar.

Inicialmente, hemos comprobado si el cálculo de la orientación normal el día 15 de cada mes resulta concordante con la producción de energía máxima de cada mes. Para esto hemos tenido en cuenta únicamente los ángulos normales a los rayos solares el día 15 de cada mes. Los datos obtenidos se pueden observar en las siguientes tablas:

Inclinación normal día 15 de cada mes		12.14	20.1	30.57	42.84	52.27	56.85	55.1	47.39	35.82	23.97	14.37	10.13
PRODUCCION (KWh)	enero	294.7803	286.7197	270.6698	244.197	218.0532	203.6925	209.2936	232.2002	260.3508	281.4699	292.9107	296.1964
	febrero	248.2779	247.4975	241.263	226.4768	209.4952	199.5335	203.4688	218.886	235.9418	245.8694	248.4129	247.9169
	marzo	236.0962	243.3551	247.2367	243.6138	234.851	228.7231	231.2089	240.0337	246.7644	245.5392	238.5056	233.6735
	abril	168.513	180.0277	190.6679	196.5863	196.3196	194.6779	195.422	196.9805	194.0667	184.5589	172.0354	165.1414
	mayo	116.8779	128.4361	140.1674	148.8298	151.7591	152.0169	152.0081	150.6469	144.5464	133.2361	120.3417	113.6085
	junio	93.23407	104.3854	116.0297	125.2367	129.0666	129.9148	129.6686	127.4356	120.5556	109.0945	96.55343	90.11594
	julio	97.12752	107.3315	117.7937	125.7248	128.6583	129.0984	129.0059	127.4819	121.7588	111.5941	100.1782	94.25288
	agosto	121.13	129.3898	137.1429	141.7029	141.8964	140.9574	141.3957	142.1545	139.6918	132.6693	123.6482	118.7255
	septiembre	168.724	174.6995	178.6985	177.8251	173.101	169.543	170.9997	175.9838	179.0572	176.6881	170.654	166.8138
	octubre	219.8906	220.5583	216.9495	206.4206	193.9016	186.4991	189.4267	200.8471	213.2617	219.8125	220.3786	219.2488
	noviembre	263.9481	258.834	246.699	225.1702	203.9824	192.41	196.9419	215.3923	238.4039	255.052	262.8764	264.6792
	diciembre	297.0789	287.4676	269.2733	240.1455	213.0523	198.5221	204.1822	227.5561	257.7526	281.5027	294.7479	298.9271
total	2325.679	2368.702	2372.591	2301.929	2194.136	2125.589	2153.022	2255.599	2352.152	2377.087	2341.243	2309.3	

**Tabla 2.** Resultados generación energética paneles MiaSolé a través de simulaciones realizadas mediante Explorador Solar para las inclinaciones normales a los rayos solares el día 15 de cada mes.

Inclinación normal día 15 de cada mes		12.14	20.1	30.57	42.84	52.27	56.85	55.1	47.39	35.82	23.97	14.37	10.13
PRODUCCION (KWh)	enero	338.8579	329.4307	309.7349	276.7045	244.3284	226.7197	233.5731	261.797	296.8765	323.0688	336.733	340.4176
	febrero	284.0568	283.6147	276.1415	257.6204	236.3672	223.9891	228.8699	248.1005	269.5048	281.75	284.3982	283.4363
	marzo	266.8432	276.3042	281.5086	277.035	265.9091	258.1449	261.2911	272.4917	280.9903	279.1931	269.9675	263.7142
	abril	184.7468	198.9159	212.1814	219.6191	219.2507	217.1556	218.1037	220.1049	216.4513	204.5451	189.0607	180.6346
	mayo	123.7672	137.4361	151.5885	162.2526	165.9332	166.2832	166.2607	164.5244	156.9524	143.1909	127.8365	119.9468
	junio	96.95449	109.8705	123.666	134.836	139.5871	140.6683	140.3503	137.5507	129.1235	115.4095	100.7706	93.3911
	julio	100.798	112.6281	125.0314	134.6711	138.3461	138.9421	138.8064	136.8544	129.8184	117.6456	104.3093	97.50851
	agosto	128.0602	137.9125	147.3377	153.0301	153.3855	152.2932	152.8079	153.6398	150.4917	141.8749	131.0459	125.223
	septiembre	183.439	190.9214	196.064	195.1894	189.4715	185.1385	186.9128	192.9734	196.6035	193.4501	185.8416	181.0717
	octubre	243.5651	244.8224	240.8137	228.1752	212.9769	203.9996	207.5475	221.4119	236.4306	244.0845	244.2951	242.6548
	noviembre	298.9572	293.068	278.3891	251.9779	225.9708	211.829	217.3554	239.9691	268.2301	288.5393	297.7742	299.7165
	diciembre	339.3777	327.9378	305.6428	269.7417	236.4541	218.7567	225.6329	254.2395	291.4476	320.6664	336.6552	341.4964
total	2589.423	2642.862	2648.1	2560.853	2427.98	2343.92	2377.512	2503.657	2622.921	2653.418	2608.688	2569.212	

**Tabla 1.** Resultados generación energética paneles CanadianSolar a través de simulaciones realizadas mediante Explorador Solar para las inclinaciones normales a los rayos solares el día 15 de cada mes.

En estas se remarca en tonos más azules los mayores valores para cada fila y en valores más rojizos los menores pasando por los blancos para los medios.

A continuación, se incluyen los valores de los demás ángulos que se estudian en las simulaciones y se ordenan la totalidad de estos en orden ascendente. Además, se incluye una nueva fila en la parte inferior donde se toma el porcentaje de producción total respecto a la inclinación óptima.

inclinacion		0	5	10.13	12.14	14.37	20.1	23.97	26	30.57	35.82	42.84	47.39	52.27	55.1	56.85	60	75	90
RODUCCION (KWh)	enero	299.2865	298.6204	296.1964	294.7803	292.9107	286.7197	281.4699	278.3945	270.6698	260.3508	244.197	232.2002	218.0532	209.2936	203.6925	193.2943	139.5144	86.29053
	febrero	242.5835	245.9552	247.9169	248.2779	248.4129	247.4975	245.8694	244.6962	241.263	235.9418	226.4768	218.886	209.4952	203.4688	199.5335	192.0568	150.2004	101.2325
	marzo	217.8327	226.4095	233.6735	236.0962	238.5056	243.3551	245.5392	246.3334	247.2367	246.7644	243.6138	240.0337	234.851	231.2089	228.7231	223.799	192.4523	148.4736
	abril	145.3567	155.6986	165.1414	168.513	172.0354	180.0277	184.5589	186.6554	190.6679	194.0667	196.5863	196.9805	196.3196	195.422	194.6779	192.974	178.4099	153.0881
	mayo	95.12999	104.6511	113.6085	116.8779	120.3417	128.4361	133.2361	135.5369	140.1674	144.5464	148.8298	150.6469	151.7591	152.0081	152.0169	151.7534	145.5821	131.2842
	junio	72.74794	81.6421	90.11594	93.23407	96.55343	104.3854	109.0945	111.3751	116.0297	120.5556	125.2367	127.4356	129.0666	129.6686	129.9148	130.1158	126.815	116.4992
	julio	78.09604	86.4007	94.25288	97.12752	100.1782	107.3315	111.5941	113.6449	117.7937	121.7588	125.7248	127.4819	128.6583	129.0059	129.0984	129.0293	124.5678	113.3157
	agosto	104.716	112.0183	118.7255	121.13	123.6482	129.3898	132.6693	134.1958	137.1429	139.6918	141.7029	142.1545	141.8964	141.3957	140.9574	139.921	130.6405	114.2101
	septiembre	154.728	161.2054	166.8138	168.724	170.654	174.6995	176.6881	177.4917	178.6985	179.0572	177.8251	175.9838	173.101	170.9997	169.543	166.6183	147.3826	119.5292
	octubre	213.0726	216.7371	219.2488	219.8906	220.3786	220.5583	219.8125	219.1444	216.9495	213.2617	206.4206	200.8471	193.9016	189.4267	186.4991	180.9261	149.1294	109.8644
	noviembre	264.9764	265.5415	264.6792	263.9481	262.8764	258.834	255.052	252.7353	246.699	238.4039	225.1702	215.3923	203.9824	196.9419	192.41	183.9009	138.0245	90.46556
	diciembre	304.3748	302.5125	298.9271	297.0789	294.7479	287.4676	281.5027	278.0199	269.2733	257.7526	240.1455	227.5561	213.0523	204.1822	198.5221	187.9844	133.9026	84.59087
total		2192.901	2257.393	2309.3	2325.679	2341.243	2368.702	2377.087	2378.224	2372.591	2352.152	2301.929	2255.599	2194.136	2153.022	2125.589	2072.373	1756.622	1368.844
% del maximo		92.20752	94.91928	97.10189	97.79058	98.44503	99.59965	99.95221	100	99.76318	98.90373	96.79197	94.84384	92.25947	90.53069	89.37716	87.13955	73.86276	57.55741

**Tabla 4.** Resultados generación energética paneles MiaSolé a través de simulaciones de Explorador Solar para todas las orientaciones estudiadas.

inclinacion		0	5	10.13	12.14	14.37	20.1	23.97	26	30.57	35.82	42.84	47.39	52.27	55.1	56.85	60	75	90
RODUCCION (KWh)	enero	342.9743	342.834	340.4176	338.8579	336.733	329.4307	323.0688	319.3709	309.7349	296.8765	276.7045	261.797	244.3284	233.5731	226.7197	214.045	150.6819	88.49705
	febrero	275.7698	280.5024	283.4363	284.0568	284.3982	283.6147	281.75	280.5217	276.1415	269.5048	257.6204	248.1005	236.3672	228.8699	223.9891	214.75	166.0429	106.4866
	marzo	243.5116	254.3986	263.7142	266.8432	269.9675	276.3042	279.1931	280.2268	281.5086	280.9903	277.035	272.4917	265.9091	261.2911	258.1449	251.9281	216.6606	159.9794
	abril	156.8291	169.2041	180.6346	184.7468	189.0607	198.9159	204.5451	206.9212	212.1814	216.4513	219.6191	220.1049	219.2507	218.1037	217.1556	214.9905	198.9001	165.6969
	mayo	98.71349	109.5793	119.9468	123.7672	127.8365	137.4361	143.1909	146.0458	151.5885	156.9524	162.2526	164.5244	165.9332	166.2607	166.2832	165.9771	158.5484	141.1049
	junio	73.9064	83.80898	93.3911	96.95449	100.7706	109.8705	115.4095	118.4717	123.666	129.1235	134.836	137.5507	139.5871	140.3503	140.6683	140.944	136.1806	124.6493
	julio	79.34892	88.61473	97.50851	100.798	104.3093	112.6281	117.6456	120.5757	125.0314	129.8184	134.6711	136.8544	138.3461	138.8064	138.9421	138.8996	132.2448	120.3184
	agosto	108.9415	117.3766	125.223	128.0602	131.0459	137.9125	141.8749	143.8403	147.3377	150.4917	153.0301	153.6398	153.3855	152.8079	152.2932	151.0642	138.6372	120.5035
	septiembre	166.2978	174.175	181.0717	183.439	185.8416	190.9214	193.4501	194.9389	196.064	196.6035	195.1894	192.9734	189.4715	186.9128	185.1385	181.5787	157.4797	125.5996
	octubre	234.4369	239.2484	242.6548	243.5651	244.2951	244.8224	244.0845	243.6891	240.8137	236.4306	228.1752	221.4119	212.9769	207.5475	203.9996	197.2581	158.4046	113.917
	noviembre	299.1126	300.3396	299.7165	298.9572	297.7742	293.068	288.5393	285.989	278.3891	268.2301	251.9779	239.9691	225.9708	217.3554	211.829	201.5015	146.6727	92.61436
	diciembre	347.1008	345.414	341.4964	339.3777	336.6552	327.9378	320.6664	316.2369	305.6428	291.4476	269.7417	254.2395	236.4541	225.6329	218.7567	206.0248	141.9475	85.99627
total		2426.943	2505.496	2569.212	2589.423	2608.688	2642.862	2653.418	2656.828	2648.1	2622.921	2560.853	2503.657	2427.98	2377.512	2343.92	2278.962	1902.401	1445.363
% del maximo		91.3474	94.30403	96.70222	97.46298	98.18806	99.47436	99.87167	100	99.67148	98.72378	96.38762	94.23483	91.38645	89.48686	88.2225	85.77754	71.60423	54.40184

**Tabla 5.** Resultados generación energética paneles CanadianSolar a través de simulaciones de Explorador Solar para todas las orientaciones estudiadas.

En las tablas de la página anterior se aprecian en color verde los valores más altos de la totalidad de la tabla y en rojo los menores.

### 3.3.2. Resultados Software *System Advisor Model*.

De igual manera que con el software de *Explorador solar* mencionado en el punto anterior, hemos realizado las simulaciones con este software denominado *System Advisor Model (SAM)*, A diferencia de *Explorador solar*, esta alternativa evalúa más variables para el cálculo de las simulaciones y, por tanto, los resultados deberían asemejarse más a los valores obtenidos realmente por nuestro laboratorio cuando este se encuentre en funcionamiento.

Se dispone nuevamente de los resultados para las inclinaciones normales a los rayos solares el día 15 de cada mes para ambas tecnologías:

Inclinación normal día 15 de cada mes		12.14	20.1	30.57	42.84	52.27	56.85	55.1	47.39	35.82	23.97	14.37	10.13
PRODUCCION (KWh)	enero	318.52	309.57	290.37	257.35	226.05	208.14	215.55	242.92	277.12	303.18	316.28	319.85
	febrero	287.03	286.11	277.74	257.55	235.48	222.18	227.73	247.60	270.21	283.86	287.26	286.55
	marzo	275.28	284.98	290.00	284.79	273.19	264.89	268.44	279.99	289.20	287.91	278.86	272.27
	abril	199.36	213.83	226.64	233.00	231.61	228.97	230.19	232.97	230.61	219.54	204.32	195.40
	mayo	161.83	179.86	197.82	210.89	214.96	215.20	215.25	213.45	204.65	187.47	167.85	157.10
	junio	89.50	99.09	108.57	115.30	117.28	117.32	117.38	116.57	112.13	103.12	92.72	86.96
	julio	117.77	129.68	141.27	149.33	151.42	151.24	151.41	150.75	145.59	134.61	121.78	114.59
	agosto	196.73	213.33	228.93	238.38	239.21	237.65	238.44	239.44	234.28	220.10	202.36	192.24
	septiembre	232.03	242.49	249.68	248.79	241.63	235.97	238.42	246.00	250.54	246.09	235.77	228.96
	octubre	296.97	299.51	295.03	278.61	258.98	246.71	251.85	269.89	289.25	298.83	298.33	295.63
	noviembre	304.81	298.12	281.79	252.06	223.53	207.54	214.14	238.82	270.00	292.90	303.24	305.69
	diciembre	338.00	325.76	302.06	262.97	227.57	207.97	216.05	246.41	286.22	317.76	334.71	340.13
total	2 818	2 882	2 890	2 789	2 641	2 544	2 585	2 725	2 860	2 895	2 843	2 795	

**Tabla 6.** Resultados generación energética paneles *MiaSolé* a través de simulaciones realizadas mediante *SAM* para las inclinaciones normales a los rayos solares el día 15 de cada mes.

Inclinación normal día 15 de cada mes		12.14	20.1	30.57	42.84	52.27	56.85	55.1	47.39	35.82	23.97	14.37	10.13
PRODUCCION (KWh)	enero	338.49	328.85	308.16	273.30	239.28	220.60	227.90	257.66	296.83	323.24	336.35	340.11
	febrero	305.35	304.30	295.20	273.80	249.72	235.79	241.28	262.98	288.80	302.36	305.58	304.74
	marzo	292.85	303.16	308.44	302.86	290.16	281.43	284.96	297.63	307.88	305.83	296.29	289.14
	abril	212.25	227.68	241.37	248.08	246.55	243.76	244.98	248.06	244.94	232.81	217.00	207.37
	mayo	172.37	191.59	210.82	224.67	229.14	229.40	229.45	227.50	216.87	198.40	178.13	166.57
	junio	95.33	105.53	115.66	122.80	124.98	125.04	125.10	124.20	118.82	109.13	98.40	92.21
	julio	125.62	138.34	150.80	159.38	161.70	161.53	161.69	160.95	154.65	142.77	129.47	121.72
	agosto	210.11	227.90	244.67	254.73	255.64	253.98	254.77	255.90	249.48	234.01	215.53	204.57
	septiembre	247.52	258.70	266.38	265.40	257.53	251.54	254.00	262.36	267.26	261.98	251.12	243.71
	octubre	316.49	319.15	314.22	296.76	275.27	262.38	267.49	287.25	309.33	318.62	317.80	314.82
	noviembre	324.47	317.25	299.59	268.13	237.01	220.28	226.80	253.74	289.49	312.67	322.97	325.54
	diciembre	359.51	346.34	320.79	279.49	240.96	220.50	228.47	261.52	307.20	339.30	356.36	362.13
total	3 000	3 069	3 076	2 969	2 808	2 706	2 747	2 900	3 052	3 081	3 025	2 973	

**Tabla 7.** Resultados generación energética paneles *CanadianSolar* a través de simulaciones realizadas mediante *SAM* para las inclinaciones normales a los rayos solares el día 15 de cada mes.

A continuación, se disponen los resultados obtenidos en este programa mediante las tablas 8 y 9:

inclinacion		0	5	10.13	12.14	14.37	20.1	23.97	26	30.57	35.82	42.84	47.39	52.27	55.1	56.85	60	75	90
PRODUCCION (KWh)	enero	321.84	321.98	319.85	318.52	316.28	309.57	303.18	299.55	290.37	277.12	257.35	242.92	226.05	215.55	208.14	196.14	130.43	71.20
	febrero	279.19	283.83	286.55	287.03	287.26	286.11	283.86	282.30	277.74	270.21	257.55	247.60	235.48	227.73	222.18	212.93	158.98	99.79
	marzo	251.10	262.58	272.27	275.28	278.86	284.98	287.91	288.91	290.00	289.20	284.79	279.99	273.19	268.44	264.89	258.75	218.74	170.10
	abril	170.13	183.40	195.40	199.36	204.32	213.83	219.54	222.00	226.64	230.61	233.00	232.97	231.61	230.19	228.97	226.61	207.28	184.01
	mayo	127.96	143.10	157.10	161.83	167.85	179.86	187.47	190.92	197.82	204.65	210.89	213.45	214.96	215.25	215.20	214.73	205.23	190.84
	junio	71.24	79.40	86.96	89.50	92.72	99.09	103.12	104.94	108.57	112.13	115.30	116.57	117.28	117.38	117.32	117.01	111.94	107.77
	julio	94.89	105.15	114.59	117.77	121.78	129.68	134.61	136.84	141.27	145.59	149.33	150.75	151.42	151.41	151.24	150.71	143.51	136.79
	agosto	164.02	178.77	192.24	196.73	202.36	213.33	220.10	223.11	228.93	234.28	238.38	239.44	239.21	238.44	237.65	235.97	219.88	199.46
	septiembre	208.09	219.29	228.96	232.03	235.77	242.49	246.09	247.50	249.68	250.54	248.79	246.00	241.63	238.42	235.97	231.66	202.04	167.63
	octubre	283.29	290.44	295.63	296.97	298.33	299.51	298.83	298.02	295.03	289.25	278.61	269.89	258.98	251.85	246.71	238.09	186.71	128.23
	noviembre	305.76	306.73	305.69	304.81	303.24	298.12	292.90	289.82	281.79	270.00	252.06	238.82	223.53	214.14	207.54	196.72	134.88	75.73
	diciembre	346.71	344.56	340.13	338.00	334.71	325.76	317.76	313.29	302.06	286.22	262.97	246.41	227.57	216.05	207.97	194.71	121.65	59.13
	total	2624.204	2719.225	2795.366	2817.832	2843.472	2882.315	2895.376	2897.179	2889.883	2859.779	2789.006	2724.808	2640.905	2584.839	2543.778	2474.024	1902.401	1590.673
	% del maximo	90.57789	93.85767	96.48578	97.26123	98.14621	99.48694	99.93777	100	99.74817	98.70909	96.26626	94.05038	91.15436	89.21917	87.80189	85.39424	71.60423	54.90419

**Tabla 8.** Resultados generación energética paneles MiaSolé a través de simulaciones de SAM para todas las orientaciones estudiadas.

inclinacion		0	5	10.13	12.14	14.37	20.1	23.97	26	30.57	35.82	42.84	47.39	52.27	55.1	56.85	60	75	90
PRODUCCION (KWh)	enero	342.07	342.27	340.11	338.49	336.35	328.85	323.24	318.22	308.16	296.83	273.30	257.66	239.28	227.90	220.60	207.12	137.05	74.21
	febrero	296.77	301.82	304.74	305.35	305.58	304.30	302.36	300.23	295.20	288.80	273.80	262.98	249.72	241.28	235.79	225.37	167.59	104.63
	marzo	266.61	278.94	289.14	292.85	296.29	303.16	305.83	307.28	308.44	307.88	302.86	297.63	290.16	284.96	281.43	274.48	231.40	179.39
	abril	180.56	194.79	207.37	212.25	217.00	227.68	232.81	236.31	241.37	244.94	248.08	248.06	246.55	244.98	243.76	241.07	220.10	194.97
	mayo	135.74	151.93	166.57	172.37	178.13	191.59	198.40	203.28	210.82	216.87	224.67	227.50	229.14	229.45	229.40	228.86	218.48	202.81
	junio	75.62	84.32	92.21	95.33	98.40	105.53	109.13	111.70	115.66	118.82	122.80	124.20	124.98	125.10	125.04	124.70	119.22	114.65
	julio	100.84	111.82	121.72	125.62	129.47	138.34	142.77	145.94	150.80	154.65	159.38	160.95	161.70	161.69	161.53	160.93	153.10	145.71
	agosto	174.54	190.39	204.57	210.11	215.53	227.90	234.01	238.29	244.67	249.48	254.73	255.90	255.64	254.77	253.98	252.05	234.48	212.24
	septiembre	221.43	233.51	243.71	247.52	251.12	258.70	261.98	264.01	266.38	267.26	265.40	262.36	257.53	254.00	251.54	246.63	214.55	177.52
	octubre	301.55	309.30	314.82	316.49	317.80	319.15	318.62	317.53	314.22	309.33	296.76	287.25	275.27	267.49	262.38	252.63	197.42	135.01
	noviembre	325.45	326.57	325.54	324.47	322.97	317.25	312.67	308.41	299.59	289.49	268.13	253.74	237.01	226.80	220.28	208.10	142.00	79.15
	diciembre	368.93	366.69	362.13	359.51	356.36	346.34	339.30	333.10	320.79	307.20	279.49	261.52	240.96	228.47	220.50	205.62	127.72	61.39
	total	2790.094	2892.351	2972.62	3000.346	3025.018	3068.774	3081.109	3084.285	3076.1	3051.539	2969.403	2899.749	2807.937	2746.874	2706.218	2627.536	1902.401	1681.685
	% del maximo	90.4616	93.77702	96.37955	97.27849	98.07841	99.4971	99.89703	100	99.73462	98.9383	96.27525	94.0169	91.04013	89.06032	87.74215	85.19109	71.60423	54.52429

**Tabla 9.** Resultados generación energética paneles CanadianSolar a través de simulaciones de SAM para todas las orientaciones estudiadas.

### 3.3.3. Análisis de los resultados

En este apartado analizaremos los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas mediante gráficos que nos permitan entender con más claridad el comportamiento de los paneles en cuanto a la variación de la energía que pueden producir al someterse a cambios de inclinación. Separaremos estos resultados en 4 bloques en los cuales estudiaremos el comportamiento mensual, el comportamiento estacional, el desempeño anual y finalmente la influencia del factor de empaquetamiento.

Además de lo mencionado, quedarán patentes las diferencias que se puedan observar entre las dos instalaciones además de las variaciones que arroja el hecho de estudiar nuestras instalaciones mediante los dos softwares de simulación diferentes.

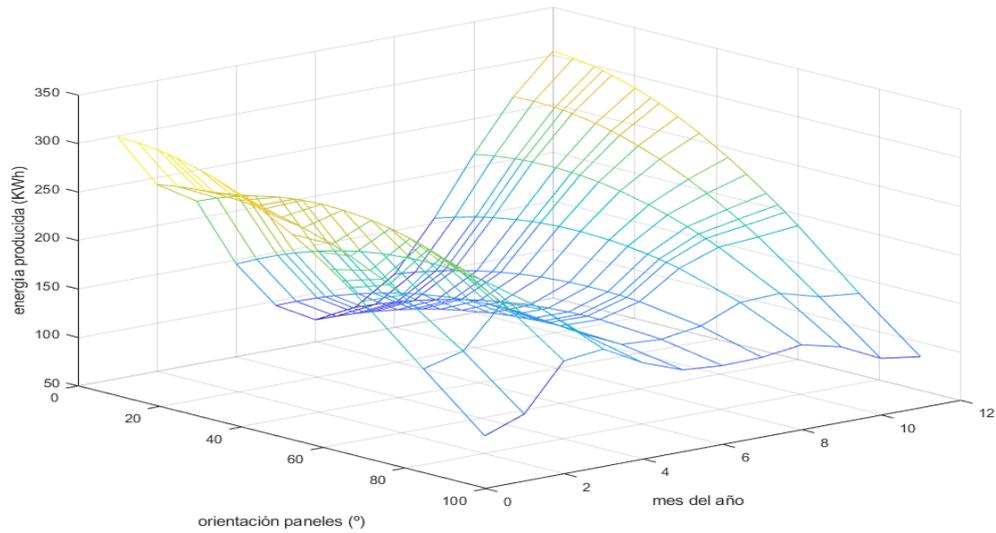
#### 3.3.3.1. Producción mensual.

Con la finalidad de simplificar el análisis del efecto de la inclinación en la producción mensual de nuestras instalaciones simuladas, estudiaremos únicamente los valores extraídos de una de las instalaciones y uno de los simuladores. El resultado y las conclusiones obtenidas serán las mismas o muy similares debido a que los colores de las celdas de las tablas se distribuyen de igual manera en los 4 casos estudiados.

Estudiaremos los resultados de la producción de los paneles MiaSolé junto con el software *Explorador Solar*.

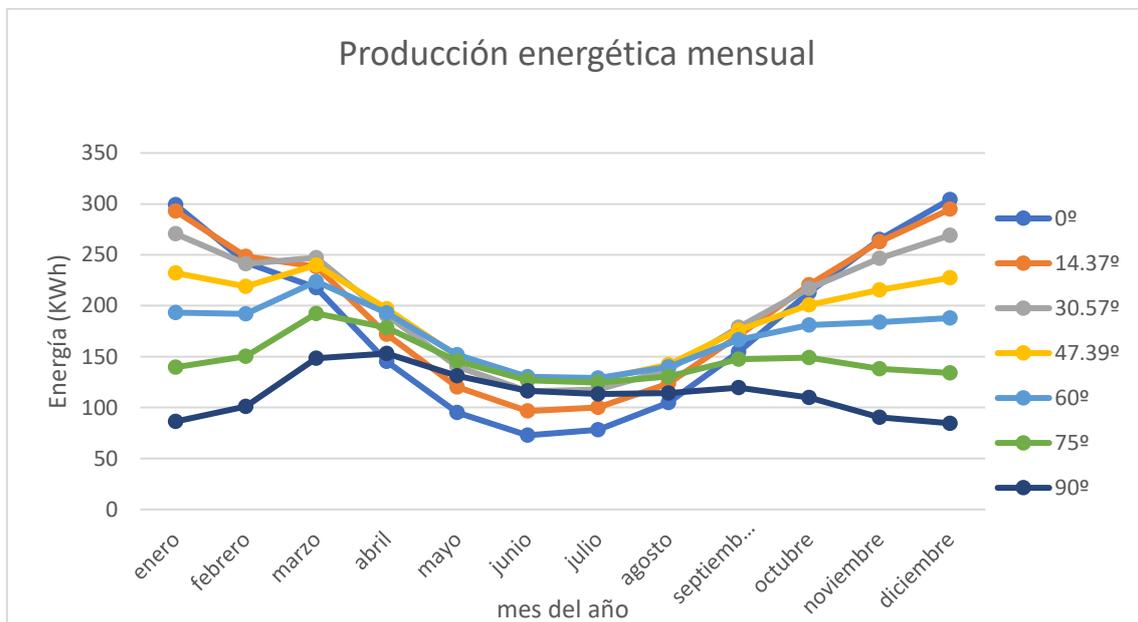
Inicialmente, observamos que en la tabla 2, donde solo se incluyen las inclinaciones calculadas como perpendiculares a los rayos solares el día 15 de cada mes, se forma una "X" de color azul. Esta representa los valores mayores para cada fila. Este hecho nos indica que el supuesto de que dichas inclinaciones permiten la mayor producción energética para su correspondiente mes es cierto, observando que en la mayoría de los casos esto se cumple y en los casos en los que no, la diferencia es de alrededor de un 1%.

Para el análisis de la tabla 4 nos apoyamos de 2 representaciones gráficas de los resultados.



**Figura 7.** Representación 3D de resultados de producción energética de los paneles MiaSolé a través de simulaciones de Explorador Solar.

En esta figura se representa en el eje x los meses del año del 1 al 12, en el eje y la inclinación de los paneles  $\beta$  y en el eje z la energía producida.



**Figura 8.** Representación de resultados de producción energética de los paneles MiaSolé a través de simulaciones de Explorador Solar.

Al visualizar la tabla 4 comprobamos que los meses de enero y diciembre son los que tienen colores más verdes. Esto se traduce en valores de producción mensual más elevados para orientaciones entre 0° y 50° debido a que la radiación incidente esos meses es más elevada, hay

más horas de luz y el clima es más soleado. Al contrario de lo que cabría pensar, reducir la inclinación de los paneles hasta 0° mejora el valor de producción de estos meses con respecto al de las orientaciones óptimas calculadas.

Por otro lado, observamos que la producción destaca para el mes de marzo consiguiendo los valores más elevados de producción en las columnas entre 42,84° y 75°.

Si focalizamos en los valores de esta tabla que adoptan colores más rojos y, por tanto, son menores, se observa que estos se dan en los meses de junio y julio para inclinaciones cercanas a la horizontal. Este hecho es debido a que, durante estos meses, los rayos solares tienen su valor de inclinación de aproximadamente 35°, incidiendo poca radiación directa en los paneles situados en inclinación de 0°. Cabe destacar que los ángulos que se han estudiado como normales a los rayos solares son de alrededor de 56,81° y 55,1° para dichos meses, lo cual supone una diferencia muy grande al poner los dispositivos horizontalmente.

Estos hechos se suman a que en los meses invernales las horas de luz y la radiación solar son menores y hay más afluencia de días nublados.

Al igual que sucede con los meses de invierno en inclinaciones cercanas a 0°, los meses de enero y diciembre adoptan valores muy bajos para inclinaciones de 90°. Durante estos meses el sol se encuentra en posición casi vertical y, por tanto, la radiación directa que recibiría nuestro panel sería de un valor muy bajo. Este hecho se traduce en una disminución de la energía que los dispositivos son capaces de producir.

Situar los paneles a inclinaciones de 90° durante los meses de invierno hace que la energía generada en estos meses sea similar a la que obtenemos en los puntos óptimos.

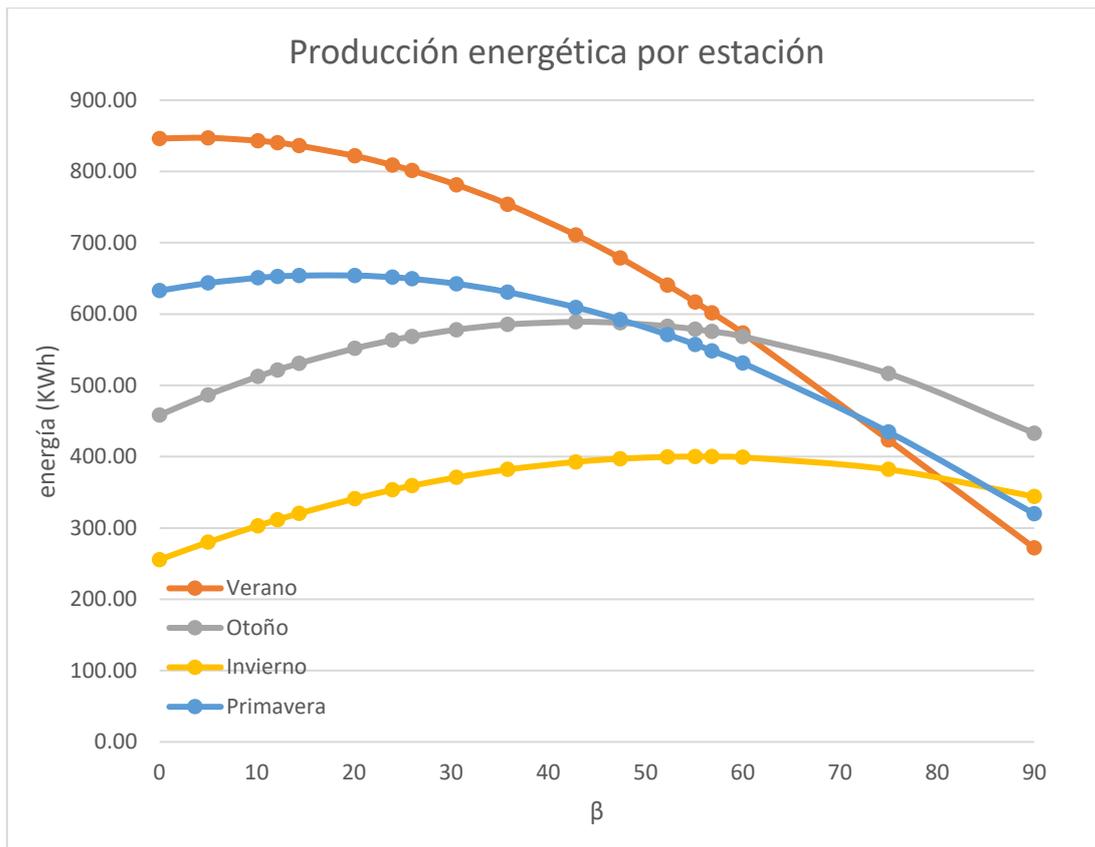
### 3.3.3.2. Producción estacional.

En este apartado vamos a estudiar el comportamiento de las instalaciones durante las estaciones que componen el año. Para ello hemos tomado las producciones de grupos de 3 meses para cada estación.

ESTACIÓN	MESES		
VERANO	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO
OTOÑO	MARZO	ABRIL	MAYO
INVIERNO	JUNIO	JULIO	AGOSTO
PRIMAVERA	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	DICIEMBRE

**Tabla 9.** Definición de las estaciones.

Estudiamos la instalación con los dispositivos *MiaSolé* y las simulaciones realizadas mediante *Explorador Solar*.

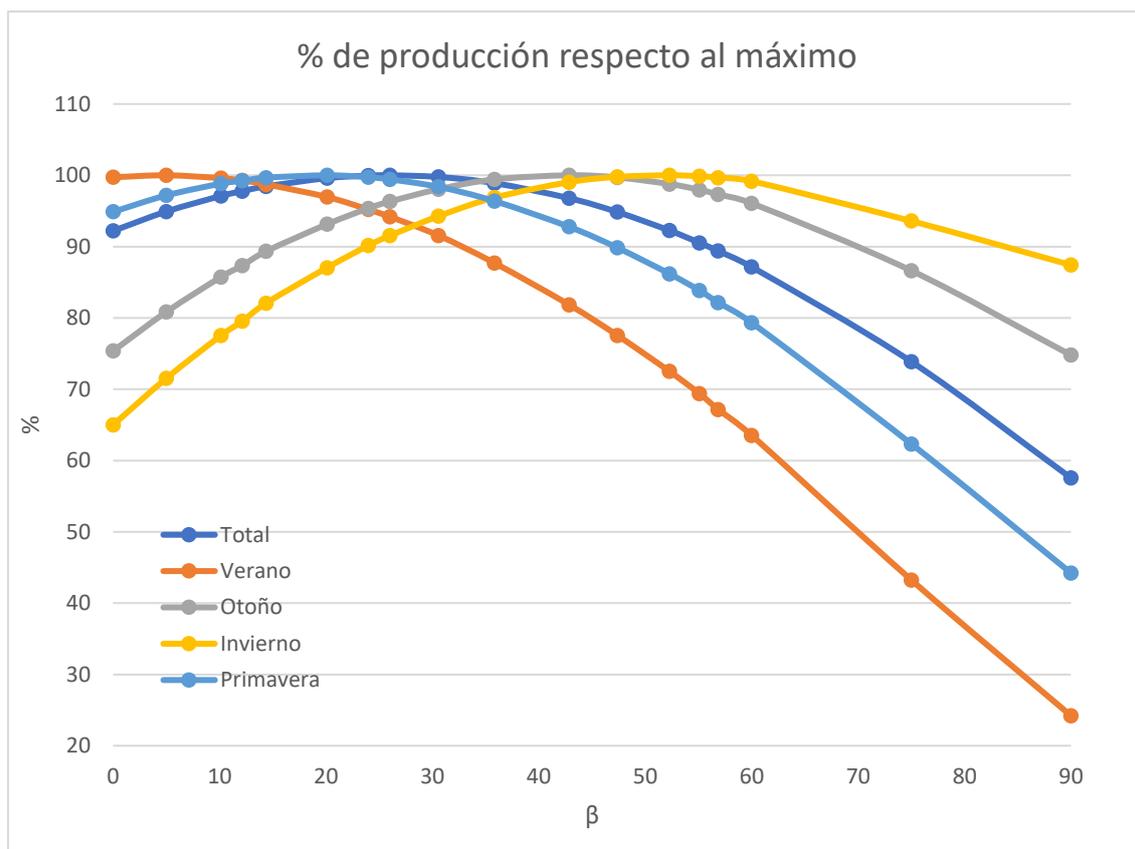


**Figura 9.** Representación de resultados de producción energética por estación.

En esta figura se puede observar que los meses de verano son los que obtienen un mayor valor de generación eléctrica para la mayoría de las inclinaciones. Abarcan una producción mayor a las demás estaciones en el rango de 0º a 60º. Esto se debe a las características climáticas y la duración de los días de los meses de verano.

Por otra parte, las estaciones de otoño y primavera tienen un rango de producción muy similar entre ellas y la producción se mantiene bastante constante en ambas. Hay una variación mayor en primavera que en otoño.

Finalmente, se determina que la producción durante el invierno es la menor de todas para casi la totalidad de las inclinaciones estudiadas. También se observa que su curvatura es muy suave.



**Figura 10.** Representación de variación de % de producción energética respecto al óptimo por estación.

En esta figura se distingue más fácilmente que los puntos óptimos varían en función de la orientación. Esta información es interesante de cara a poder determinar el mejor ángulo de inclinación para cada estación, permitiendo la mayor generación de energía posible durante esta.

La curva con menos variación es la de la producción en otoño, que varía un 25% respecto al punto máximo.

Por el contrario, la curva que tienen una mayor variación es la de verano, observando que situar los paneles a  $90^\circ$  hace disminuir la energía obtenida en un 75%.

También se observa que en invierno puede resultar interesante situar los paneles a  $90^\circ$  ya que la disminución de energía obtenida es de un 12,5%. Esta se podría compensar instalando más paneles para un mismo espacio ya que si estos se situasen sobre superficies verticales no sería necesario tener que dejar espacio entre paneles.

De estos resultados se obtiene que las mejores inclinaciones para cada estación tal y como se encuentran definidas son las siguientes.

ESTACIÓN	INCLINACIÓN ÓPTIMA
VERANO	$5^\circ$
OTOÑO	$42,84^\circ$
INVIERNO	$52,27^\circ$

PRIMAVERA	20,1º
-----------	-------

**Tabla 10.** *Inclinación óptima para cada estación.*

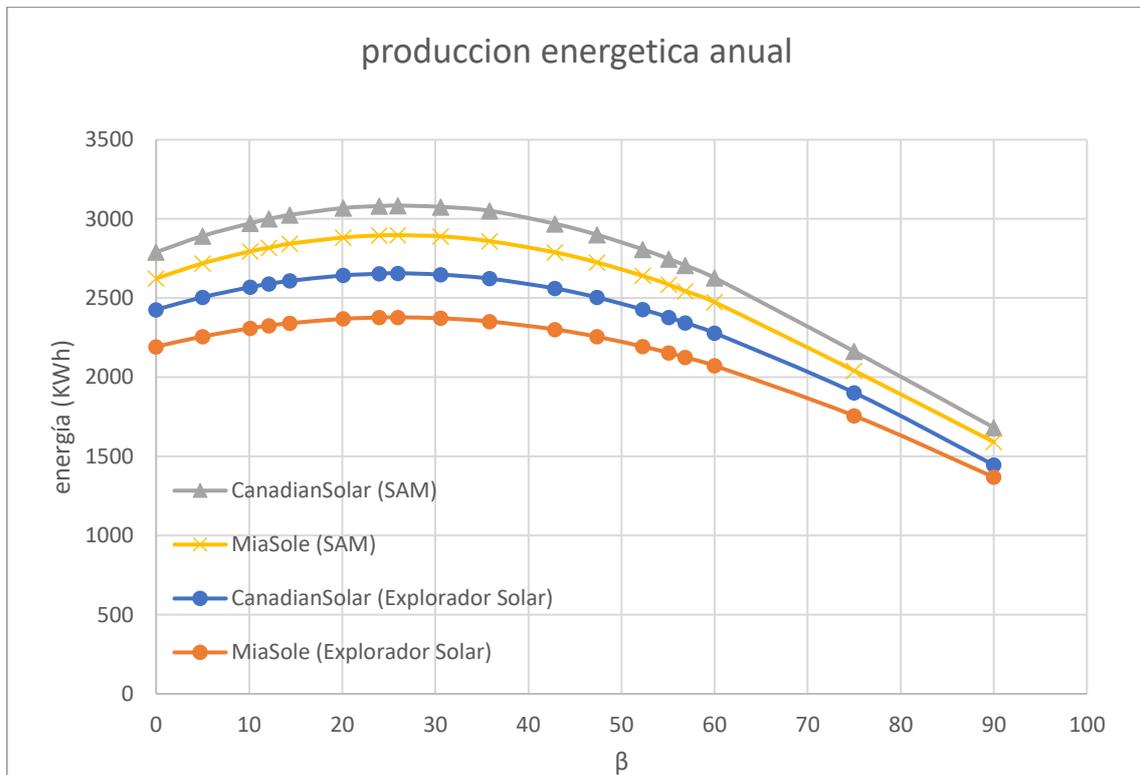
Se puede observar una alta disparidad en los ángulos que ofrecen un mayor rendimiento a nuestra instalación para cada una de las estaciones.

La totalidad de las curvas presenta caídas menores a un 5% en el rango de  $\beta$  óptimo  $\pm 15^\circ$ .

### 3.3.3.3. Producción anual

En este apartado evaluaremos la variación de energía anual producida por nuestras instalaciones considerando todas las simulaciones de manera conjunta.

En la siguiente gráfica hacemos una comparación de los valores de energía obtenidos en cada una de las simulaciones.



**Figura 11.** *Puesta en común de las energías producidas anualmente.*

En la figura 11 podemos observar claramente como los resultados en *System Advisor Model* (amarillo y gris) representan valores de energía mayores que los obtenidos mediante el software *Explorador Solar* (azul y naranja). Esto se debe a los archivos de meteorología que estos toman para la localización dada. En el caso de los que utiliza *Explorador Solar* son mucho más extensos y tienen en cuenta la variación horaria de radiación y sombras aproximada de cada mes. Por otro lado, los valores del archivo empleado en SAM tienen un menor detalle de estos factores y solo analiza la variación diaria de estos valores.

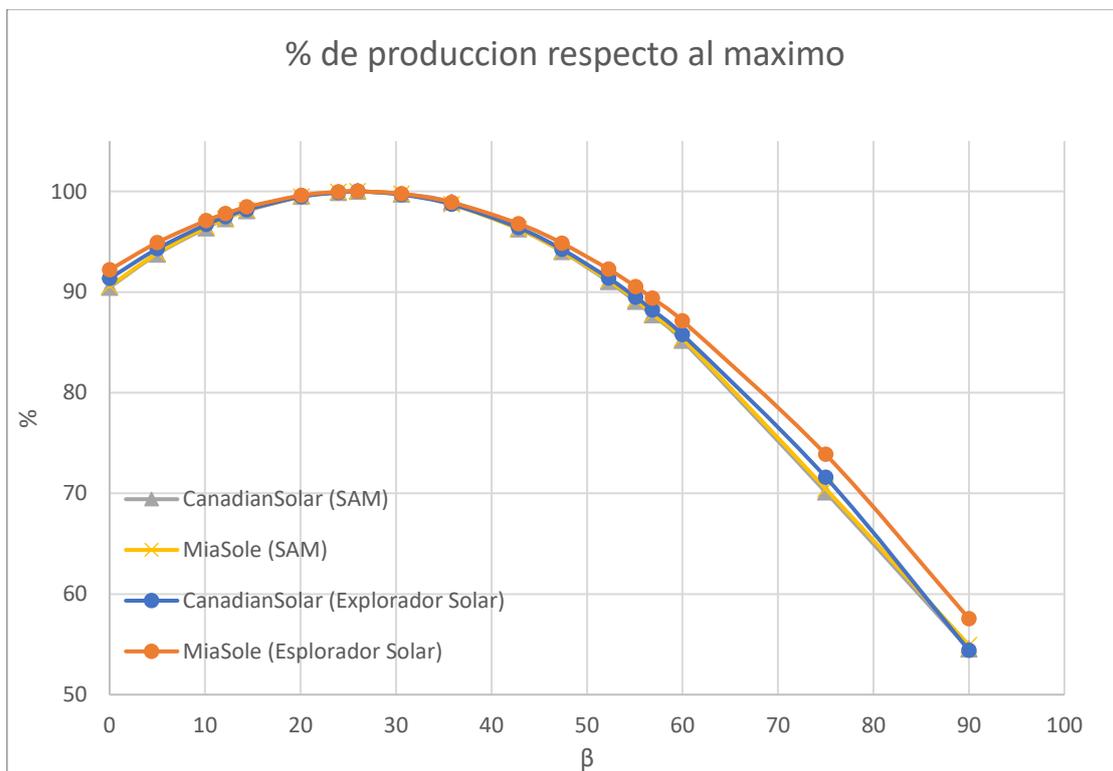
Este hecho hace que las simulaciones en SAM presenten alrededor de un 15% más de producción, un valor demasiado elevado que habrá que contrastar posteriormente en las pruebas en laboratorio y observar cuál de los softwares obtiene una visión más realista de la producción.

En la figura 11 destaca claramente la variación en la producción que se observa entre las dos tecnologías. Esta se debe en mayor medida a la diferencia de número y potencias máximas que disponemos, en el caso de los CanadianSolar, disponemos de 5 unidades que confieren 325W cada una, obteniendo así un total de 1625W de potencia máxima. Por otro lado, aunque los paneles MiaSolé disponen de una potencia máxima mayor, en concreto 380W, la potencia del conjunto se ve reducida a causa de que el número de estos es de tan solo 4, obteniendo así una potencia total de 1520W, aproximadamente un 7% menor que la de los otros paneles.

Esta disminución de potencia máxima se traduce en una menor producción energética anual visible en los resultados del gráfico anterior.

Si la potencia resultante de los dos grupos de paneles solares hubiese resultado más similar, estas curvas presentarían valores más semejantes.

Podemos constatar que la variación de la curva es similar independientemente de la tecnología o del simulador utilizado, Esto se puede observar con más detalle en la figura 12.



**Figura 12.** Puesta en común de los % de producción respecto al máximo.

En este gráfico podemos observar que la variación que encontramos en el porcentaje de producción entre los dos paneles es muy similar, siendo la curvatura que este sigue un poco menos agudizada en el caso de los paneles MiaSolé evaluados con Explorador Solar. En todos

los casos, encontramos una curvatura el máximo de que se sitúa en el punto de 26° y que luego decrece hacia ambos lados de este punto, obteniendo una bajada no mayor a un 10% en los puntos entre 0° y 50°, lo que supone un rango de ±25° alrededor del valor óptimo. Posteriormente, se da una bajada de hasta un 45% si observamos los resultados obtenidos en el punto de 90°.

La similitud entre las curvas nos permite trabajar posteriormente con el resultado de la media obtenida de estas cuatro para otros estudios donde se requiera un modelo de variación de la energía producida por paneles solares fotovoltaica en función de la inclinación.

Es importante destacar que esta figura solo representa la localización en que se han realizado las simulaciones.

A su vez, esta se asemeja mucho a una curva cuadrática por lo que podemos extraer una regresión polinomial de grado 2 que simplifique aún más el modelo el resultado de que es el siguiente:

$$\% = -0,011 x^2 + 0,5705 x + 92,045$$
$$R^2 = 0,997$$

#### 3.3.4. Generación energética teniendo en cuenta la ocupación del espacio.

En este punto vamos a trabajar directamente con los porcentajes anteriormente obtenidos ya que, debido a que la energía obtenida es dependiente de la cantidad de paneles que se han estudiado carecería de sentido pensar que vamos a producir más energía en nuestro modelo ya que esto solo sería cierto si tuviésemos un mayor número de dispositivos.

Los porcentajes se van a ver multiplicados por la  $fel'$  para así observar cómo puede variar la producción energética que podemos obtener de un espacio en función de la distancia que hemos de dejar entre paneles. Se ha decidido hacer uso de la  $fel'$  y no de la  $fel$ , debido a que los resultados resultan más gráficos y comprensibles, al comparar directamente estos con el porcentaje del punto óptimo (26°).

Como he mencionado en el párrafo anterior, esta variación de energía al variar la orientación solo se puede dar si varía el número de paneles. Con inclinaciones por debajo de los 26°, las hileras de paneles se han de separar menos y por tanto se pueden instalar más paneles. Esta nueva disposición deberá generar más energía.

Por otro lado, inclinaciones superiores supondrán haber de dejar más espacio entre hileras de paneles y, por tanto, reducir la cantidad que se puede instalar en un espacio limitado. Si esto se ve sumado de la disminución del rendimiento que supone alejar la inclinación del punto óptimo, obtendremos que, para el mismo espacio, la producción resulta mucho menor.

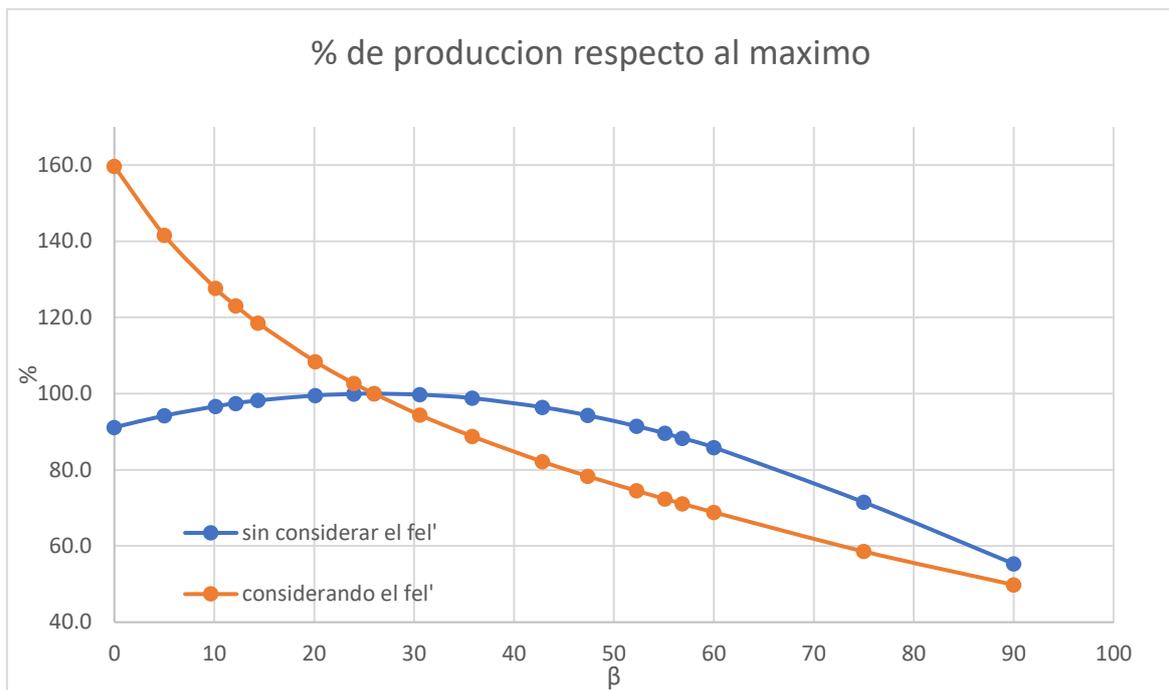
Teniendo en consideración todo lo mencionado anteriormente obtenemos los siguientes valores para cada tecnología de panel y simulador analizados, disponibles en la tabla 8:

% de generación considerando el factor de empaquetamiento																		
$\beta$	0	5	10.13	12.14	14.37	20.1	23.97	26	30.57	35.82	42.84	47.39	52.27	55.1	56.85	60	75	90
CanadianSolar (ES)	160.0	141.7	127.7	123.1	118.5	108.4	102.7	100.0	94.3	88.7	82.1	78.3	74.4	72.3	71.0	68.8	58.7	49.0
CanadianSolar (SAM)	158.5	140.9	127.3	122.9	118.4	108.4	102.7	100.0	94.4	88.9	82.0	78.1	74.1	72.0	70.6	68.3	57.5	49.1
MiaSolé (ES)	161.5	142.6	128.2	123.5	118.8	108.5	102.7	100.0	94.4	88.9	82.5	78.8	75.1	73.2	72.0	69.9	60.5	51.8
MiaSolé (SAM)	158.7	141.0	127.4	122.9	118.4	108.4	102.7	100.0	94.4	88.7	82.0	78.1	74.2	72.1	70.7	68.5	57.7	49.4
Media aritmética	159.7	141.6	127.6	123.1	118.5	108.4	102.7	100.0	94.4	88.8	82.1	78.3	74.5	72.4	71.1	68.8	58.6	49.8

**Tabla 8.** % de generación considerando el factor de empaquetamiento.

En la tabla 8 se observa como los valores obtenidos son muy similares para cada columna, resultandos independientes en gran medida del software que hemos usado para generar las simulaciones y de la tecnología del panel empleada. Esto nos permite tomar como valor general el de la media aritmética para posibles cálculos posteriores que se quieran llevar a cabo y el análisis de la influencia de este factor.

Al comparar la capacidad de producir energía en un espacio dado teniendo en consideración el factor de empaquetamiento (agregando un mayor número de paneles en el mismo espacio) con la que habíamos obtenido previamente al estudio de la influencia del  $fel'$  se obtiene la siguiente gráfica:



**Figura 13.** Comparación % de producción respecto al punto óptimo considerando el  $fel'$ .

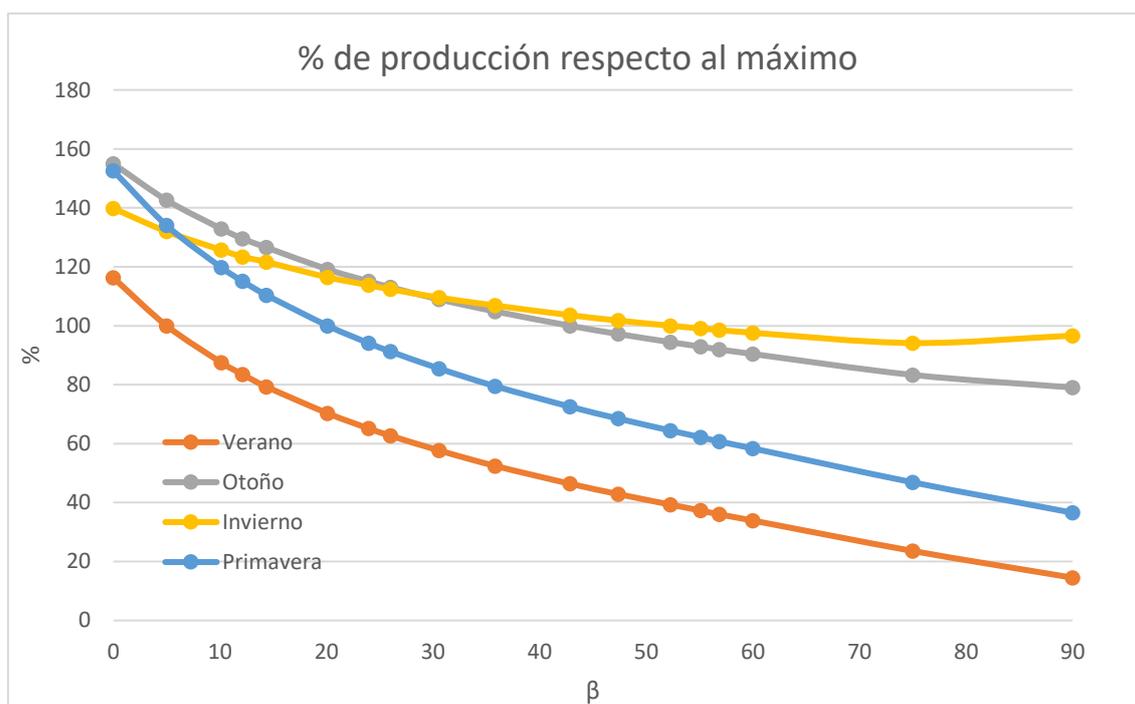
Como se puede observar, el punto que ofrece una mayor energía en el mismo espacio a lo largo de todo el año es el de  $0^\circ$ , debido esto a que no es necesario dejar separación entre paneles.

De esta forma se obtiene que en mismo espacio que ocupan nuestros paneles en el plano situando estos a  $26^\circ$ , se puede obtener un 60% más de energía procedente del sol, aplicando un 75% más de paneles ( $fel' = 1,75$ ).

Este hecho puede resultar muy interesante en lugares donde el espacio sea un factor limitante de cara a producir la energía suficiente requerida por nuestra fuente de consumo como puede ser el tejado de un edificio residencial o la cubierta de una nave industrial. De esta forma se obtiene una mayor producción neta de energía anual para la misma superficie.

No obstante, la aplicación de este factor supone una mayor inversión inicial debido a la necesidad de más paneles fotovoltaicos instalados y el uso de cables e inversor que admitan más potencia.

Como hemos estudiado en puntos anteriores, reducir a 0° la inclinación de los paneles produce una caída de rendimiento de los paneles bastante grande en la estación de invierno, en concreto de un 35%. Para evaluar si resulta interesante aplicar la reducción de la inclinación junto con la instalación de más paneles para las diferentes estaciones, se incluye esto al cálculo de la variación de producción para cada estación, tomando ahora como punto de referencia del ángulo de inclinación  $\beta$ , el valor de inclinación que suponía una mayor generación energética para cada estación.



**Figura 14.** Comparación % de producción respecto al punto óptimo considerando el  $\beta$  para cada estación.

Esta operación verifica que independientemente de la estación del año en que nos encontremos, aplicar más paneles situados de forma horizontal resulta óptimo para la mayor producción energética de un área.

Se observa que el crecimiento en producción energética menor se da en los meses que componen la estación de verano, alcanzando esta un incremento de un 16,25% respecto a su punto óptimo. Esto se debe a que el ángulo óptimo de generación eléctrica para este periodo se encuentra en los 5°. Esta pequeña diferencia de inclinación supone la posibilidad de instalar un 16,57% de paneles más, cifra similar al incremento energético obtenido.

Todas las demás estaciones del año ven incrementada la producción en valores mayores. En concreto del 39,81% en invierno, 52,55% en primavera y 54,98% en otoño.

Para el caso de 90° tendríamos un efecto similar a los 0° el cual resulta interesante en los meses de invierno, ya que podríamos situar los paneles en una fachada vertical y aprovechar este espacio sin tener que dejar espacio entre filas de paneles lo cual nos permite nuevamente instalar un gran número de paneles en un área reducida.

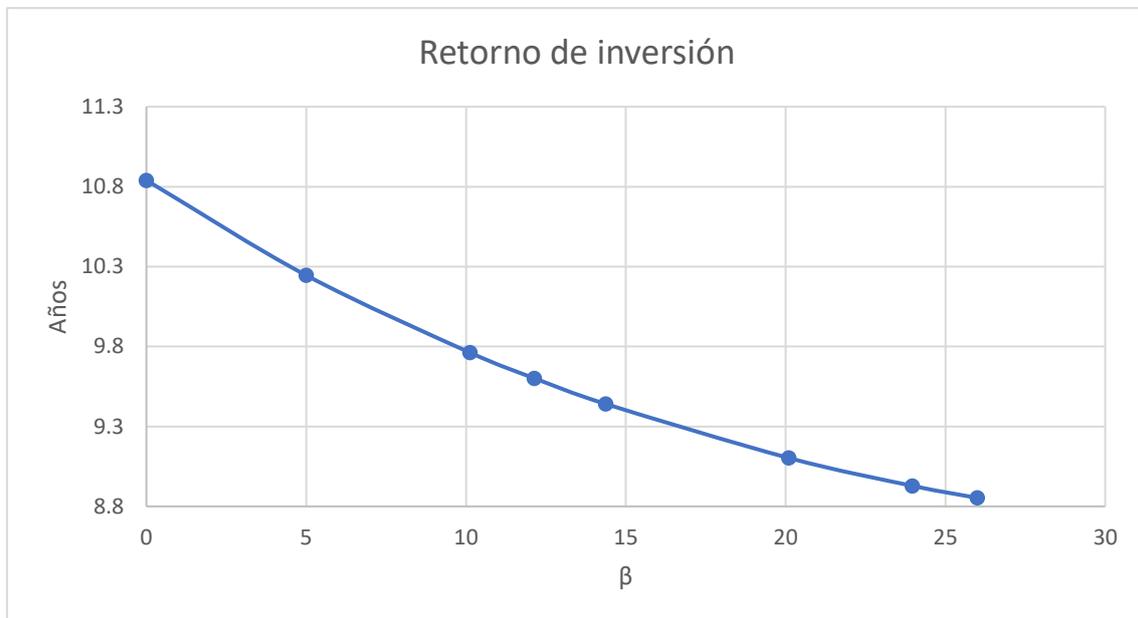
La viabilidad de esta medida requiere un estudio individual en el que se tenga en cuenta la energía que se consume de los paneles, la energía que se compra a la red y la energía que se vende a la red.

Para el estudio vamos a considerar nuevamente el caso de los paneles solares MiaSolé y los resultados de Explorador Solar.

Consideramos que una instalación promedio tiene un coste de 2.000.000 CLP/KW, de esta forma tenemos que nuestra instalación tiene un coste de 3.000.000 CLP para el caso de 26° y de 5.250.000 CLP para un 75% de paneles más como en el caso de 0°.

- CASO 1: Consumimos la energía que produce nuestra planta a 26° y vendemos la restante.

$$RDI = \frac{Coste}{(2378,224) * 142,490 + (E - 2378,224) * 0,7 * 142,490}$$

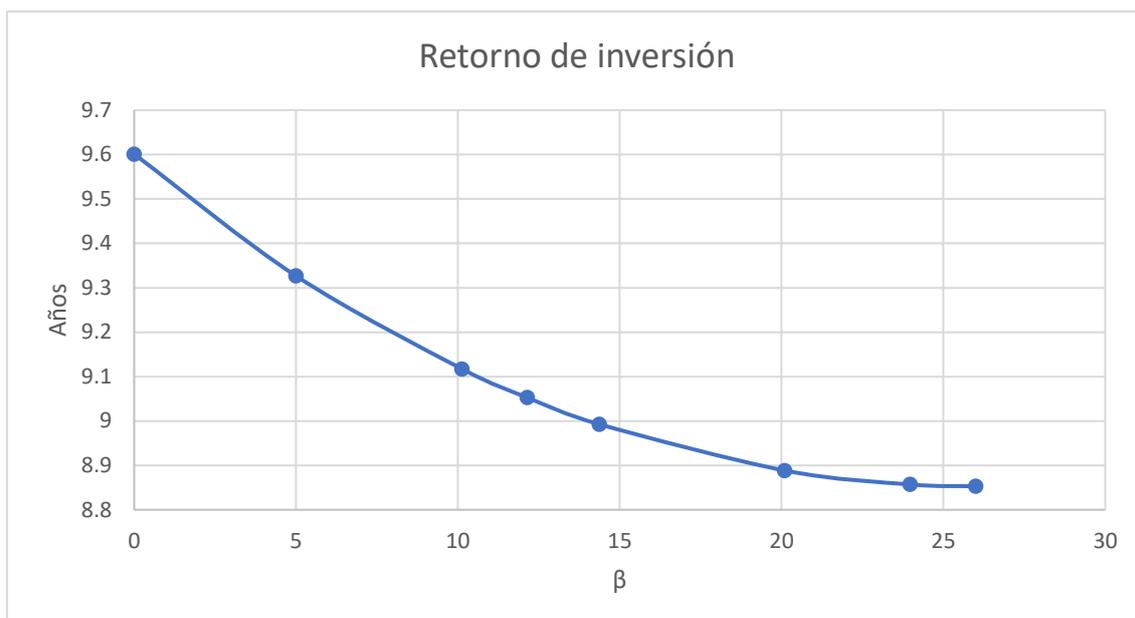


**Figura 15.** Retorno de inversión de la instalación vendiendo restante.

Vemos que el retorno de inversión siempre se dará en un tiempo mayor que para el punto de 26°, esto se debe a que tenemos una mayor inversión inicial, un rendimiento de la instalación menor y la venta de energía se realiza también a coste menor.

- CASO 2: Consumimos la energía que produce nuestra planta a 0° con un 75% de paneles más y compramos la faltante.

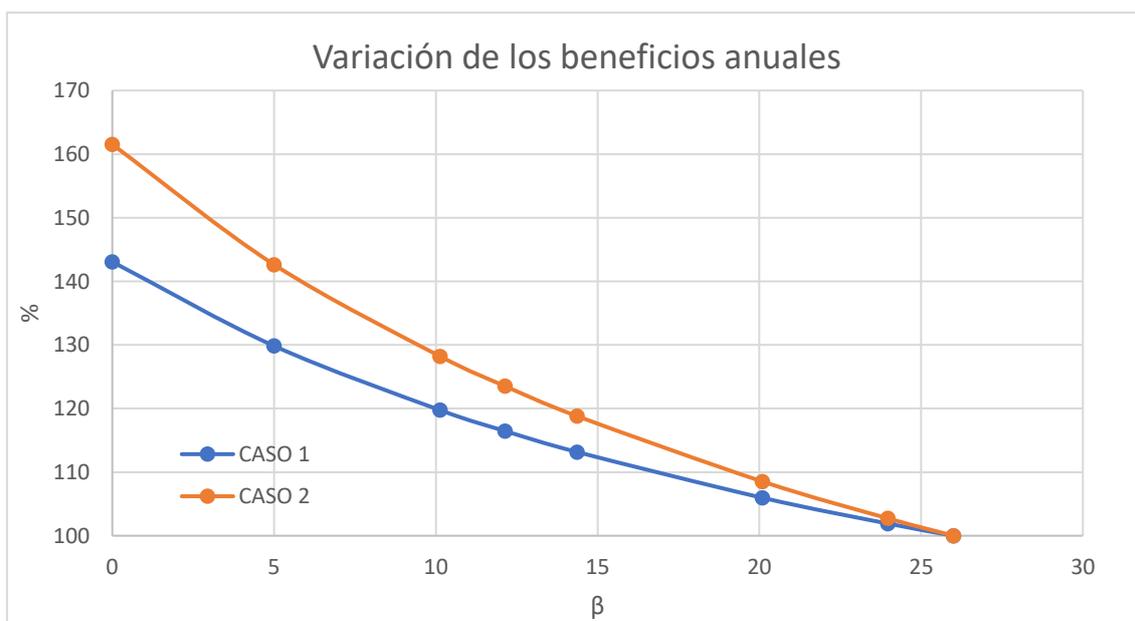
$$RDI = \frac{Coste}{(3841,5) * 142,490 - (3841,5 - E) * 142,490}$$



**Figura 15.** Retorno de inversión de la instalación comprando faltante.

Nuevamente ocurre algo similar al caso anterior, en este caso el retorno de inversión se da en un menor tiempo que en el caso anterior, pero sigue siendo mayor tiempo necesario en función de cuanto nos alejamos del punto óptimo de trabajo.

No obstante, cabe destacar que una vez realizado el retorno de inversión los beneficios anuales de nuestra instalación serán entre un 43% y un 61% mayores para el valor de 0°. Lo más recomendable es utilizar de manera local la mayor parte de la energía fotovoltaica obtenida.



**Figura 16.** Variación de los beneficios anuales.

## 4. Diseño de laboratorio de producción energética solar fotovoltaica en azotea de edificio IMA.

### 4.1. Finalidad de la instalación.

Para un estudio más en profundidad de la variación de energía producida por los paneles solares en función de la inclinación a la que se disponen, se ha decidido verificar los valores de las simulaciones mediante la instalación de una central de producción de energía eléctrica fotovoltaica en la azotea del edificio IMA de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Esta central funcionará como un laboratorio en el cual se medirá la potencia que los paneles entregan durante determinados momentos del día y se analizará, en función de otras variables meteorológicas como son la temperatura, la velocidad del viento y la radiación solar incidente. Todas estas también se deberán medir in situ mediante una estación meteorológica.

Para el desarrollo de la planta, la universidad contaba previamente con diferentes materiales ya adquiridos en el pasado y que se utilizarán para la construcción y puesta en funcionamiento de esta. Se encuentran detallados en el apartado Simulaciones subapartado materiales.

Además, se dispondrá de dos unidades de soportes abatibles que permiten la variación de la inclinación de los paneles entre los valores de 0° y 90°.

La infraestructura constará de dos instalaciones que funcionarán de forma individual e independiente. En una se instalarán los 5 dispositivos *CanadianSolar CS6U-325P* y en la otra los otros 4 dispositivos *MiaSolé Flex-02 380W*. Esto, por una parte, es necesario debido a que estos dos tipos de dispositivos no pueden funcionar juntos por aspectos relacionados con los valores de funcionamiento y, por otra parte, nos permite estudiar de manera individual las variaciones y funcionamiento que ambas tecnologías poseen.

### 4.2. Diseño de la instalación.

El diseño de la instalación se ha realizado sobre los archivos BIM que se disponen del edificio y el software *Revit*. De esta forma se evitan problemas de interferencias una vez se empiece a realizar la instalación y se puede observar de antemano el correcto emplazamiento de los paneles. Además de esto, se puede establecer la posición más adecuada en lo que a evitar sombras se refiere.

#### 4.2.1. Disposición de los paneles.

Para ocupar el menor espacio posible de superficie en la azotea, se ha decidido instalar parte de los paneles en el tejado del edificio. No es posible instalar la totalidad de los paneles aquí ya que hay una salida de ventilación que generaría sombras en los puntos que se encuentran más al sur de esta y, por ende, reduciría la producción de los paneles. Este hecho nos obliga a poder instalar

en este espacio únicamente la mitad de los paneles y, la otra mitad, en el espacio practicable del nivel de la azotea.

Debido a que los paneles que se dispongan en la zona practicable de la azotea se encontrarán más accesibles para su manipulación, se ha determinado que la mejor práctica posible es establecer aquí la estructura que permite la variación del valor de orientación. De esta misma forma, los paneles en posición horizontal se dispondrán en el tejado.

Los paneles se conectarán en serie. De esta forma la corriente y voltaje de la instalación serán:

$$V = N * V_{mp}$$

$$I = I_{mp}$$

La disposición de los paneles en el edificio se puede observar en los planos 2,3, 4 y 5 que se entregan en el archivo *Planos*.

#### 4.2.2. Efecto de las sombras.

Para evitar la disminución de producción energética de los paneles producida por las sombras, es importante analizar los elementos que pueden generar sombras sobre los paneles. Posteriormente se debe emplazar los paneles en los lugares dónde se vean menos influenciados por el efecto de las sombras que generan estos elementos.

La azotea se encuentra bordeada por una barandilla compuesta por cuerdas metálicas que se soportan mediante unos pilares de obra que sobresalen del plano del suelo. Se encuentran en la mitad y los extremos de los costados del espacio.

Es importante evitar el efecto de las sombras que los pilares provocan sobre los paneles con el objetivo de que los paneles se vean lo menos influenciados posible y así poder generar una comparación equitativa con las simulaciones.

También se observa una parte de la construcción sobre el nivel de la azotea. Esta se trata de la cubierta del edificio que permite el acceso a la azotea donde se quiere instalar la planta de generación eléctrica, contiene además dos salas actualmente sin uso y un tercer espacio dónde se encuentra la escalerilla eléctrica. Esta construcción tiene una elevación de 3,5m y genera sombra en el espacio que se encuentra más al oeste durante toda la mañana.

Con la finalidad de disminuir el efecto de las sombras, se han dispuesto los dispositivos de tal forma que las sombras de estos pilares no afecten en la mayoría del tiempo a los paneles instalados en este espacio. En los planos 7, 8 y 9 se puede observar la influencia del sol sobre los paneles el día 21 de junio, día en el cual el sol se encuentra a una menor inclinación y por tanto las sombras son de mayor tamaño.

Este día las sombras no influirán en el funcionamiento de los paneles entre las 8.30h y las 17.15h. Este mismo día, el Sol sale a las 7.13 y se pone a las 17.57, lo que supone un periodo en el que las sombras podrán influir en el funcionamiento del panel de 1 hora y 17 minutos en la mañana y de 42 minutos en la tarde.

No obstante, los valores de producción en estas horas, independientemente de si los paneles se viesen influidos o no por las sombras, serán cercanos a 0. Esto es debido a que el valor de

radiación es aún bajo y la inclinación del sol es la menor de todo el día, por tanto, la radiación incidente sobre los paneles será muy baja en estos periodos de tiempo.

#### 4.2.3. Disposición de los inversores y cuadro eléctrico.

Los inversores se instalarán en una de las dos salas que actualmente se encuentran en desuso. De entre las dos, se ha tomado la sala situada más lejos de la puerta de acceso al espacio, cuenta con canalización eléctrica accesible dónde posteriormente se conectará nuestra instalación de producción energética para volcar toda la energía producida al edificio.

Se dispondrá de los inversores y del cuadro eléctrico en la misma pared dónde se encuentra la canalización ya instalada. Se situarán a una altura de 1.5m sobre el suelo que permitirá una posterior manipulación de estos, de forma cómoda, por el operario del laboratorio. La disposición sobre la pared se encuentra detallada en el plano 6 del documento *Planos*.

#### 4.2.4. Medición de variables.

Con el objetivo de obtener los datos de clima en tiempo real y utilizar estos en futuros análisis de nuestros paneles solares, se dispone de una estación meteorológica con los siguientes sensores:

- Piranómetro.
- Termómetro
- Sensor de humedad
- Sensor de viento

Con ellos se obtendrán valores que nos permitirán introducir variables en nuestro análisis en caso de querer profundizar en otros factores que influyan en la producción energética.

Todos estos se encuentran incluidos en una central meteorológica. Se instalará sobre el tejado del edificio IMA en un espacio dónde las sombras que genere no afecten a los paneles dispuestos en este. Se ha determinado que un lugar adecuado es la esquina suroeste de ese tejado. La localización se está marcada en el documento *Planos*.

Para la medición de la potencia generada por nuestros paneles necesitaremos medir el voltaje y la corriente que estos están generando a la entrada de nuestro inversor.

El dispositivo encargado de recopilar los datos no es capaz de medir intensidades sobre 1A, para esto se dispondrá de una Resistencia Calibrada tipo Shunt que permite medir la diferencia de potencial entre los bornes de esta y posteriormente transformar este valor en el valor de corriente mediante una división. Se ha decidido que se tomará una resistencia shunt del tipo 100<sup>a</sup>/75mV, lo cual se traduce en que, para una corriente de 100A, se dará una caída de tensión de 75mV en los bornes de esta. El cálculo de la intensidad queda detallado en la siguiente expresión:

$$I (A) = V_{shunt} (mV) * \frac{100 (A)}{75 (mV)}$$

Nuestro dispositivo de recopilación de datos tiene una sensibilidad de medida de voltaje de  $10e-5$  que nos permite una correcta medida de la caída de tensión que se observa en la resistencia Shunt.

Para obtener el valor de tensión de los paneles se medirá la diferencia de potencial eléctrico entre los 2 cables que llegan a nuestro inversor de manera directa. Nuestro dispositivo de medida permite medidas de voltaje de hasta 300V, valor 72,5V superior a los máximos esperables en nuestra instalación.

La potencia generada se obtiene como la multiplicación del voltaje por la intensidad.

#### 4.2.5. Distribución de los conductos eléctricos.

La distribución de los conductos eléctricos metálicos se ha diseñado sobre el proyecto BIM de electricidad del edificio. De esta forma se evitan las interferencias con los tubos eléctricos ya instalados.

Los conductos de ambas instalaciones y de la estación meteorológica entrarán a la sala a través de una chapa metálica instalada sobre la puerta de acceso a esta. Se ha preferido situar la entrada por aquí ya que es más sencillo de perforar que el material de las paredes.

El diámetro del tubo que se ha diseñado es de 21mm. Este es el mismo que ya se encuentra instalado en el edificio.

Los conductos eléctricos que lleguen a las conexiones de los paneles solares que se encuentren instalados en el soporte flexible deberán ser flexibles para permitir el correcto funcionamiento de esta estructura.

La distribución de los conductos se puede observar en los planos 2, 3, 4, 5 y 6 disponibles en el documento *Planos*.

#### 4.2.6. Cableado.

El área de la sección de los cables y longitud de estos tiene asociado un efecto resistivo, el cual se traduce en pérdidas que afectan al voltaje que llega a el inversor y a un incremento de la temperatura de los cables por efecto Joule.

Tanto el IDAE (Instituto para la diversificación y ahorro de la Energía) como el AVEN (Agencia Valenciana de la Energía) recomiendan un máximo de pérdidas para el total de la instalación del 1,5%.

El circuito que une los paneles solares que hay sobre la azotea con el inversor tiene una longitud de 18,8m. El que une los paneles situados en el tejado con el inversor tiene una longitud de 6,4m

Para el caso de la instalación que cuenta con paneles los 4 dispositivos *MiaSolé*, los datos necesarios para el cálculo de la sección de los cables son:

$$V_{tmp} = 126 V$$

$$I_{tmp} = 12,06 A$$

$$S = 4 \text{ mm}^2$$

$$L_c = 5 m$$

Estos mismos en el caso de los 5 paneles *CanadianSolar* son:

$$V_{tmp} = 185 V$$

$$I_{tmp} = 8,78 A$$

$$S = 4 \text{ mm}^2$$

$$L_c = 13 m$$

Analizando los datos obtenemos la siguiente tabla con los resultados:

	Sección diseñada	%ΔV	
		MiaSolé	CanadianSolar
Circuito azotea	10 mm <sup>2</sup>	1,498	1,427
Circuito tejado	4 mm <sup>2</sup>	1,401	1,379

**Tabla 9.** Sección del cable y %ΔV de los circuitos.<sup>12</sup>

El diseño eléctrico mediante un diagrama unifilar se encuentra detallado en el plano 10 del documento *Planos*.

#### 4.2.7. Conexiones.

Generalmente, las conexiones de los paneles solares estandarizadas son estancas para evitar un posible cortocircuito o fallo eléctrico debido al contacto con el agua. Como punto en contra, no permiten la cómoda conexión y desconexión de estas, necesaria en nuestro proyecto para poder cambiar los grupos de paneles de posición.

Debido a esto, haremos las conexiones que se encuentren en el exterior mediante conexiones impermeables “tipo bala” de estándar IP67, las cuales permiten generar una unión a prueba de agua gracias a juntas de estanqueidad.



**Figura 17.** Ejemplo de uniones impermeables “tipo bala”.

#### 4.2.8. Seguridad.

Para evitar posibles problemas de cortocircuitos o sobrecargas en nuestra instalación instalaremos 1 interruptor automáticos de 10A entre cada inversor y la conexión al edificio.

No se requiere protección diferencial ya que este aspecto se encuentra cubierto por la instalación general del edificio.

## 5. Diseño de y metodología de recogida de datos.

### 5.1. Finalidad.

La finalidad de este apartado es determinar la metodología de trabajo en el laboratorio mediante el cambio de inclinación de los paneles y el tiempo de permanencia de estos.

### 5.2. Cálculo de los ángulos de estudio.

Debido a que las inclinaciones estudiadas en las simulaciones son 18, un estudio para cada mes de todas estas supondría realizar el cambio de inclinación cada menos de 2 días. Se ha decidido minimizar estos cambios a únicamente 3 inclinaciones por mes:  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  y una inclinación intermedia entre estos dos puntos.

A partir de estos, mediante métodos numéricos, generaremos la curva de energía mensual similar a la que se da mediante el uso de todas las inclinaciones. La curva que tiene en cuenta todas las inclinaciones cuenta con forma parabólica de grado 2. Al tomar 3 puntos de cálculo podemos realizar una regresión polinómica de grado 2 que se asemejará mucho a la que toma en cuenta todos los puntos.

El cálculo de los ángulos que consiguen una menor diferencia entre las dos curvas se ha hecho tomando el ángulo intermedio que minimiza el área formada entre la regresión polinómica tomando todos los puntos y la regresión que toma solo 3 puntos. Como se muestra en la figura 16.



**Figura 18.** Diagrama del método realizado para el cálculo del ángulo de inclinación intermedio.

Los resultados obtenidos para ambas tecnologías de paneles se encuentran disponibles en las tablas 10 y 11.

MiaSolé												
Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Resultado	47.39	47.39	47.39	42.84	35.82	75.0	56.85	52.27	47.39	42.84	47.39	47.39
Simplificado	45	45	45	45	35	75	55	55	45	45	45	45

**Tabla 10.** *Inclinación de estudio intermedio de los paneles MiaSolé*

CanadianSolar												
mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Resultado	47.39	47.39	42.84	42.84	42.84	42.84	26.0	30.57	47.39	47.39	47.39	47.39
Simplificado	45	45	45	45	45	45	30	30	45	45	45	45

**Tabla 11.** *Inclinación de estudio intermedio de los paneles CanadianSolar*

### 5.3. Determinación temporal de las posiciones.

En este apartado se dispone de los tiempos en los cuales se situará el panel para cada mes durante 2 años. De esta forma se puede estudiar cada tecnología durante un año completo.

Se ha considerado el inicio de nuestro estudio el día 1 de agosto de 2022.

AÑO 1	Paneles MiaSolé			Paneles CanadianSolar
	Ángulo 1	Ángulo 2	Ángulo 3	Ángulo 1
	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 1
8	0°	55°	90°	0°
	1-10	11-20	21-31	1-31
9	0°	45°	90°	0°
	1-10	11-20	20-30	1-30
10	0°	45°	90°	0°
	1-10	11-20	21-31	1-31
11	0°	45°	90°	0°
	1-10	11-20	21-30	1-30
12	0°	45°	90°	0°
	1-10	11-20	21-31	1-31

<b>1</b>	0°	45°	90°	0°
	1-10	11-20	21-31	1-31
<b>2</b>	0°	45°	90°	0°
	1-9	10-19	20-28	1-28
<b>3</b>	0°	45°	90°	0°
	1-10	11-20	21-31	1-31
<b>4</b>	0°	45°	90°	0°
	1-10	11-20	21-30	1-30
<b>5</b>	0°	35°	90°	0°
	1-10	11-20	21-31	1-31
<b>6</b>	0°	75°	90°	0°
	1-10	11-20	21-30	1-30
<b>7</b>	0°	55°	90°	0°
	1-10	11-20	21-31	1-31

**Tabla 12.** Disposiciones de los paneles durante el primer año.

<b>AÑO 2</b>	<b>Paneles CanadianSolar</b>			<b>Paneles MiaSolé</b>
	<b>Ángulo 1</b>	<b>Ángulo 2</b>	<b>Ángulo 3</b>	<b>Ángulo 1</b>
	<b>Periodo 1</b>	<b>Periodo 2</b>	<b>Periodo 3</b>	<b>Periodo 1</b>
<b>8</b>	0°	30°	90°	0°
	1-10	11-20	21-31	1-31
<b>9</b>	0°	30°	90°	0°
	1-10	11-20	20-30	1-30
<b>10</b>	0°	45°	90°	0°
	1-10	11-20	21-31	1-31
<b>11</b>	0°	45°	90°	0°
	1-10	11-20	21-30	1-30
<b>12</b>	0°	45°	90°	0°
	1-10	11-20	21-31	1-31
<b>1</b>	0°	45°	90°	0°
	1-10	11-20	21-31	1-31
<b>2</b>	0°	55°	90°	0°
	1-9	10-19	20-28	1-28
<b>3</b>	0°	55°	90°	0°
	1-10	11-20	21-31	1-31
<b>4</b>	0°	45°	90°	0°
	1-10	11-20	21-30	1-30
<b>5</b>	0°	45°	90°	0°
	1-10	11-20	21-31	1-31
<b>6</b>	0°	45°	90°	0°
	1-10	11-20	21-30	1-30
<b>7</b>	0°	30°	90°	0°
	1-10	11-20	21-31	1-31

**Tabla 13.** Disposiciones de los paneles durante el segundo año.

#### 5.4. Frecuencia de muestreo.

En este apartado se detalla cada cuanto tiempo debe recoger nuestro dispositivo *AGILENT* los valores de los sensores meteorológicos y los valores de tensión y corriente.

Se ha determinado que una buena frecuencia de muestreo sería de 4 muestras por hora, de esta forma se toman las medidas en intervalos de 15 minutos. Esto supone un total de 96 muestras diarias, 2880 muestras mensuales y 35.040 muestras anuales.

Se ha escogido el valor de 15 minutos entre medidas porqué a través de este se puede determinar las variaciones que ha sufrido el clima y la producción del panel durante todo el día sin elevar la totalidad de muestras que se toman mensual o anualmente a números demasiado elevados, que dificulten la posterior tarea computacional del análisis de las medidas.

#### 5.5. Mantenimiento y limpieza.

Para un correcto funcionamiento del laboratorio habremos de realizar un mantenimiento de los dispositivos que asegure que el funcionamiento correcto de estos y una limpieza de polvo y suciedad de los paneles solares de nuestra instalación.

Esta comprobación y limpieza se llevará a cabo los días en los que se cambie la orientación de los paneles, estipulados en el punto 5.3.

## 6. Conclusión.

Como conclusiones de este proyecto podemos definir que los paneles solares son actualmente una de las tecnologías más instaladas en lo que se refiere a producción energética mediante fuentes renovables.

Esta tecnología se puede ver su producción afectada por diferentes factores como pueden ser las sombras, la climatología o la suciedad.

Uno de los objetivos de este proyecto ha sido estudiar la variación producida en la producción solar debida a las variaciones en la inclinación a las que se encuentran los paneles solares. Para esto se ha hecho uso de software de simulación de instalaciones fotovoltaicas y se ha analizado y expuesto cómo se comporta el funcionamiento de un panel solar al variar la inclinación a la que este se instala.

Este análisis se ha realizado partiendo desde los valores de producción mensual, posteriormente los valores de producción durante las estaciones del año y, finalmente los resultados del año completo.

Los resultados han arrojado que si nos distanciamos de la orientación que produce un mayor valor de energía eléctrica la energía que va a producir nuestra central se verá mermada en menos de un 1% en el rango de variación de 10º sobre el punto de producción óptimo y en un 10% en el rango de 25º. Finalmente se observa un 45% menos de producción si instalamos los paneles de forma vertical.

Se han analizado tanto las dos tecnologías de paneles como los dos softwares que se han utilizado para la realización de las medidas obteniendo así las diferencias entre estos.

Entre ellas se observa un comportamiento igual en el rendimiento de los paneles de tecnología CIGS MiaSolé y los paneles de tecnología policristalina CanadianSolar al variar la inclinación.

A su vez, se ha analizado que el conjunto de paneles CanadianSolar arroja siempre una mayor producción energética independientemente de la inclinación a la que se encuentren o el software utilizado. Esto es debido a que el conjunto de estos paneles tiene una potencia nominal un 7% mayor que el conjunto de paneles MiaSolé.

En la comparación de los dos softwares utilizados se ha observado que System Advisor Model presenta resultados más optimistas de cara a la producción energética que el software Explorador Solar. También, se observa que los dos softwares modelizan de igual manera la variación de energía producida por los paneles al variar la inclinación en la que se instalan.

En los resultados se ha tenido en cuenta el espacio que se ha de dejar entre filas de paneles solares fotovoltaicos de manera que las sombras de estos no incidan sobre las de las filas de después.

Los resultados de este factor demuestran que para un área dada resulta más interesante instalar más paneles solares de manera horizontal y sin espacio entre filas que situar los paneles en el punto de mayor producción de estos. Este estudio ha resultado satisfactorio considerando tanto el valor de la inclinación óptima de producción energética anual como para las diferentes estaciones que componen el año.

Con lo que respecta a situar los paneles a 0º la mejora en la energía producida en la misma área durante un año completo es de un 60%.

Esta medida puede resultar interesante cuando la superficie disponible con la que se cuenta es muy baja y la demanda no se puede satisfacer situando los paneles en la orientación óptima, pero, a la vez, supone un mayor coste de la instalación y un mayor tiempo de retorno de la inversión. Esto es debido al incremento en el número de paneles, la necesidad de instalar cables de más sección e inversores de mayor potencia nominal y el hecho de que los paneles funcionan a menor rendimiento.

Por otro lado, en los meses de invierno, puede resultar interesante instalar los paneles a 90º sobre superficies como paredes ya que el rendimiento de los paneles para esta orientación solo se ve reducido en un 12,5% pero nos permitiría instalar los paneles con menos separación entre ellos o sin utilizar espacios útiles como una azotea practicable.

Otro de los objetivos del proyecto ha sido el diseño de una planta de producción fotovoltaica situada en la azotea del edificio IMA del campus San Joaquín de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

En este diseño se han incluido 2 plantas de generación independientes con características que concuerdan con los datos que se han empleado en las simulaciones. Para efectuar el diseño se ha empleado el archivo de *Revit* mediante el cual se hizo el modelo del edificio y de las especialidades. De esta forma se consigue saber de antemano que nuestra instalación no generará interferencias con las instalaciones previas del edificio.

Se han detallado los elementos que formarán la instalación, la disposición de los paneles, inversores, cuadro eléctrico, tubos aislantes, sistema de adquisición de datos, características de los cables y los sensores que se precisa instalar. Se ha respaldado esta información mediante los planos que se encuentran en el Documento II *Planos*.

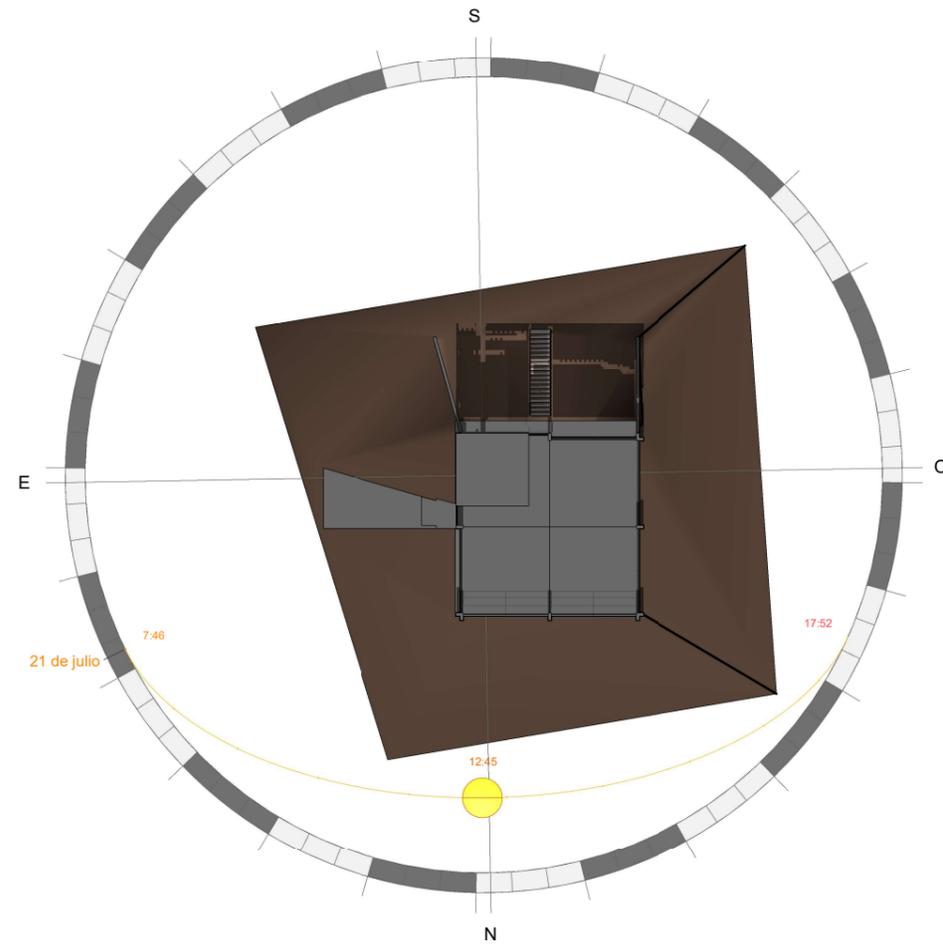
Finalmente se ha determinado las posiciones y periodos en los cuales los paneles permanecen en estas para cada mes durante 2 años. Siguiendo estos se permite una adquisición de datos con los que posteriormente podemos comparar los resultados reales con los obtenidos en las simulaciones.

## 7. Bibliografía.

1. Bernal NG. Matriz energética y eléctrica en Chile. *Bibl del Congr Nac Chile*. Published online 2021.
2. Bosio A, Pasini S, Romeo N. The history of photovoltaics with emphasis on CdTe solar cells and modules. *Coatings*. 2020;10(4). doi:10.3390/coatings10040344
3. Universitat Politècnica de València. Tema 3. Energía Solar Fotovoltaica. Published online 2019:9-25.
4. Díaz-Dorado E, Suárez-García A, Carrillo C, Cidrás J. Influence of the shadows in photovoltaic systems with different configurations of bypass diodes. *SPEEDAM 2010 - Int Symp Power Electron Electr Drives, Autom Motion*. Published online 2010:134-139. doi:10.1109/SPEEDAM.2010.5542226
5. Appelbaum J, Bany J. SHADOW EFFECT OF ADJACENT SOLAR : i " // I. 1979;23(4):497-507.
6. Palacios Rios JI, Morales Benavides A. Productividad de Paneles Solares Monocristalinos. *Somim*. Published online 2017:73-81.
7. Canadian Solar. PV Module Product Datasheet- MaxPower CS6U-315|320|325|330P. Published online 2016.
8. CIGS Flexible Modules: High Power Density in a Flexible Form Factor MiaSolé FLEX SERIES-02W. Accessed July 10, 2022. [www.miasole.com](http://www.miasole.com)
9. Solar Technology SA. SUNNY BOY 1.5 / 2.0 / 2.5 con SMA SMART CONNECTED Servicio inteligente con SMA Smart Connected SUNNY BOY 1.5 / 2.0 / 2.5.
10. Orientación e Inclinación de los Paneles Solares Fotovoltaicos. Orientación e Inclinación de los paneles. Accessed July 10, 2022. <https://www.mpptsolar.com/es/orientacion-inclinacion-paneles-solares.html>
11. Solar T tienda online de E. Distancia entre filas de paneles solares. Cómo evitar el sombreado. Distancia entre filas de paneles solares para evitar el sombreado. Published December 5, 2016. Accessed July 10, 2022. <https://tecnosolab.com/noticias/distancia-entre-filas-de-paneles-solares/>
12. Calculadora de secciones cables. Accessed July 10, 2022. <https://www.monsolar.com/calculadora-secciones-cables>

# DOCUMENTO II

## Planos



1 {3D}



DISEÑO E INSTALACIÓN DE LABORATORIO  
DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA  
FOTOVOLTAICA EN PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

PLANO:

ORIENTACIÓN EDIFICIO IMA

FECHA:

JULIO 2022

Nº plano:

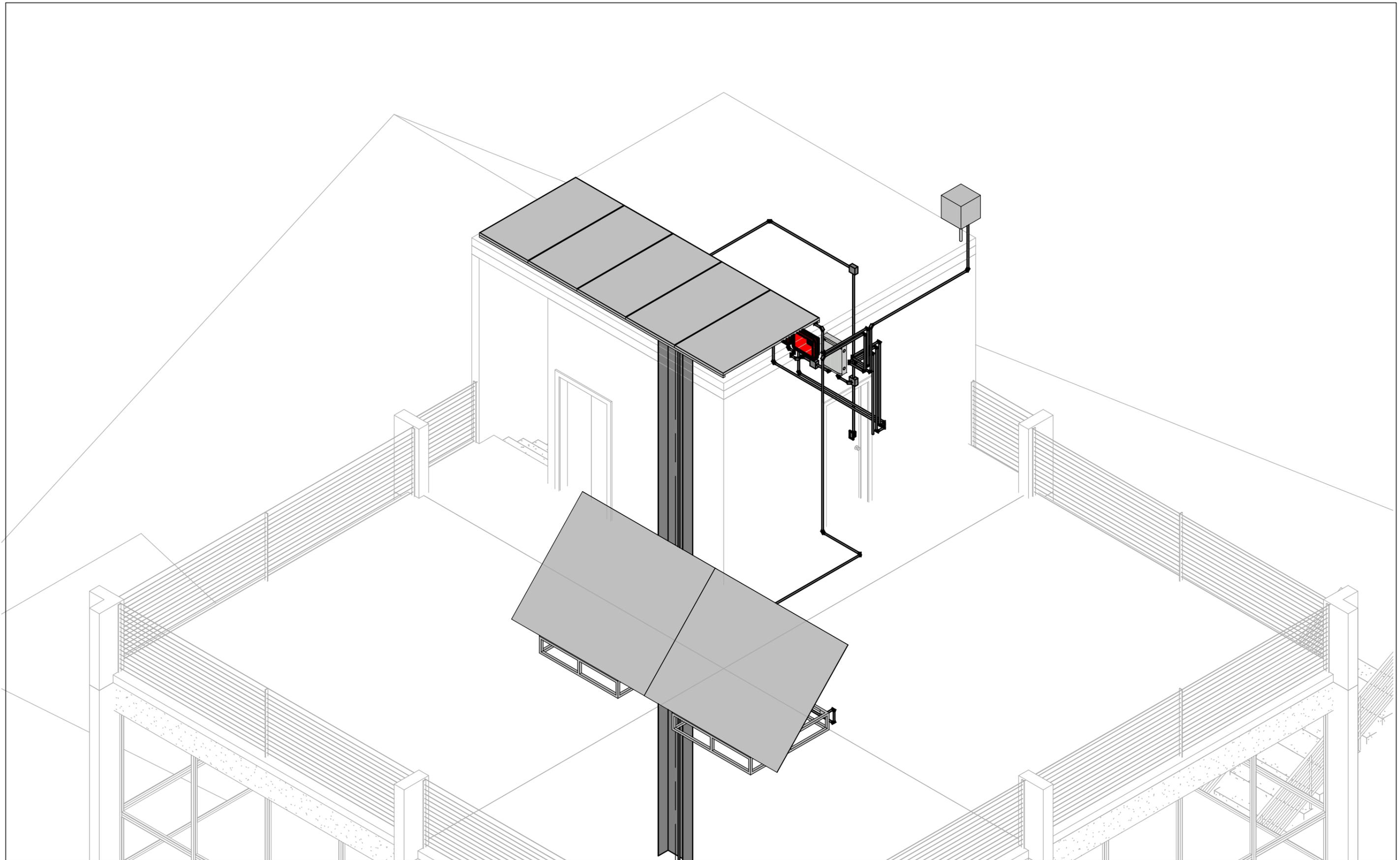
AUTOR:

JORGE RIBERA ESPLUGUES

ESCALA:

1 : 500

1



DISEÑO E INSTALACIÓN DE LABORATORIO  
DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA  
FOTOVOLTAICA EN PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

PLANO:

DISPOSICIÓN DE LABORATORIO EN AZOTEA IMA

FECHA:

JULIO 2022

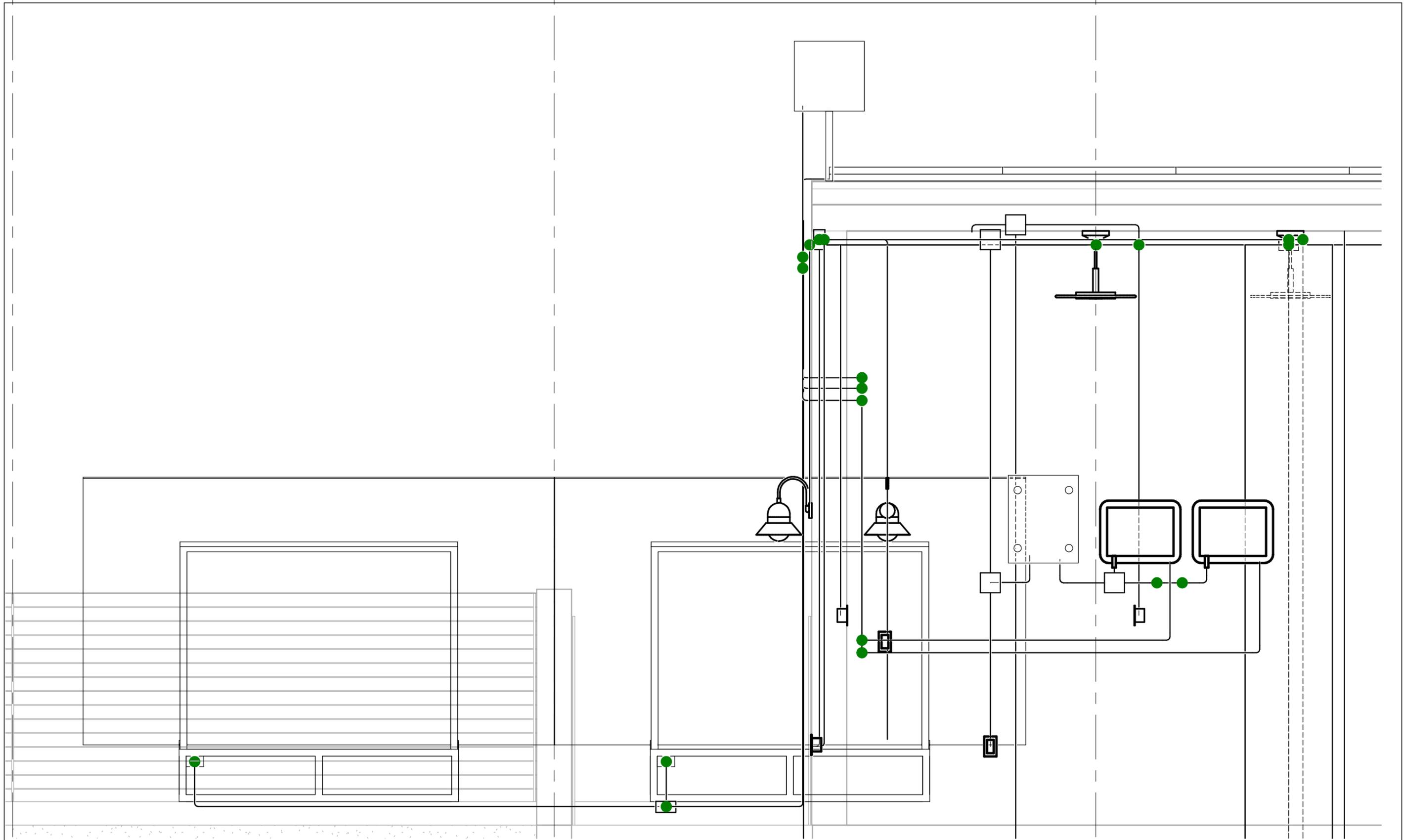
Nº plano:

2

AUTOR:

JORGE RIBERA ESPLUGUES

ESCALA:



DISEÑO E INSTALACIÓN DE LABORATORIO  
DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA  
FOTOVOLTAICA EN PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

PLANO:

ALZADO LABORATORIO EN AZOTEA IMA

FECHA:

JULIO 2022

Nº plano:

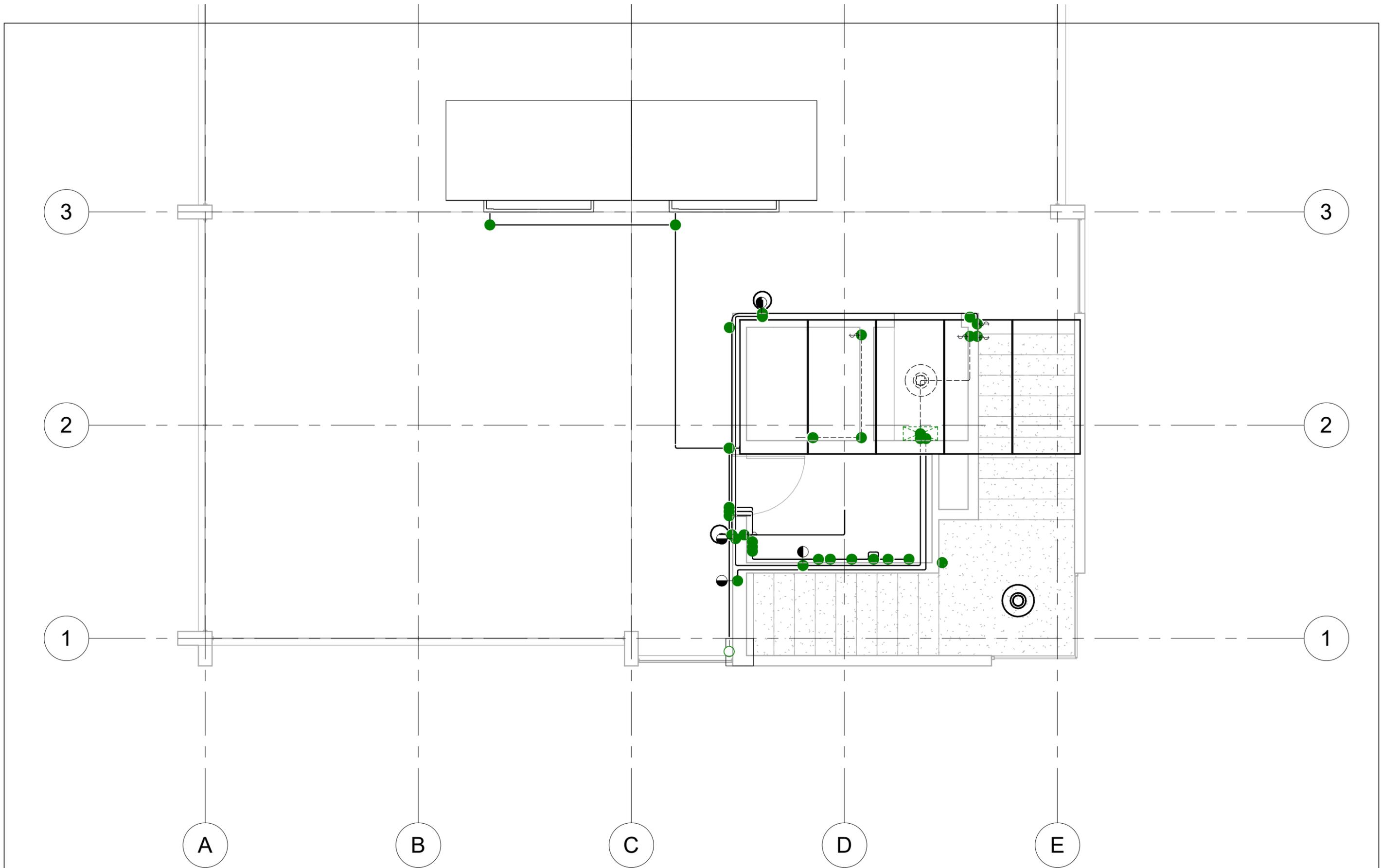
3

AUTOR:

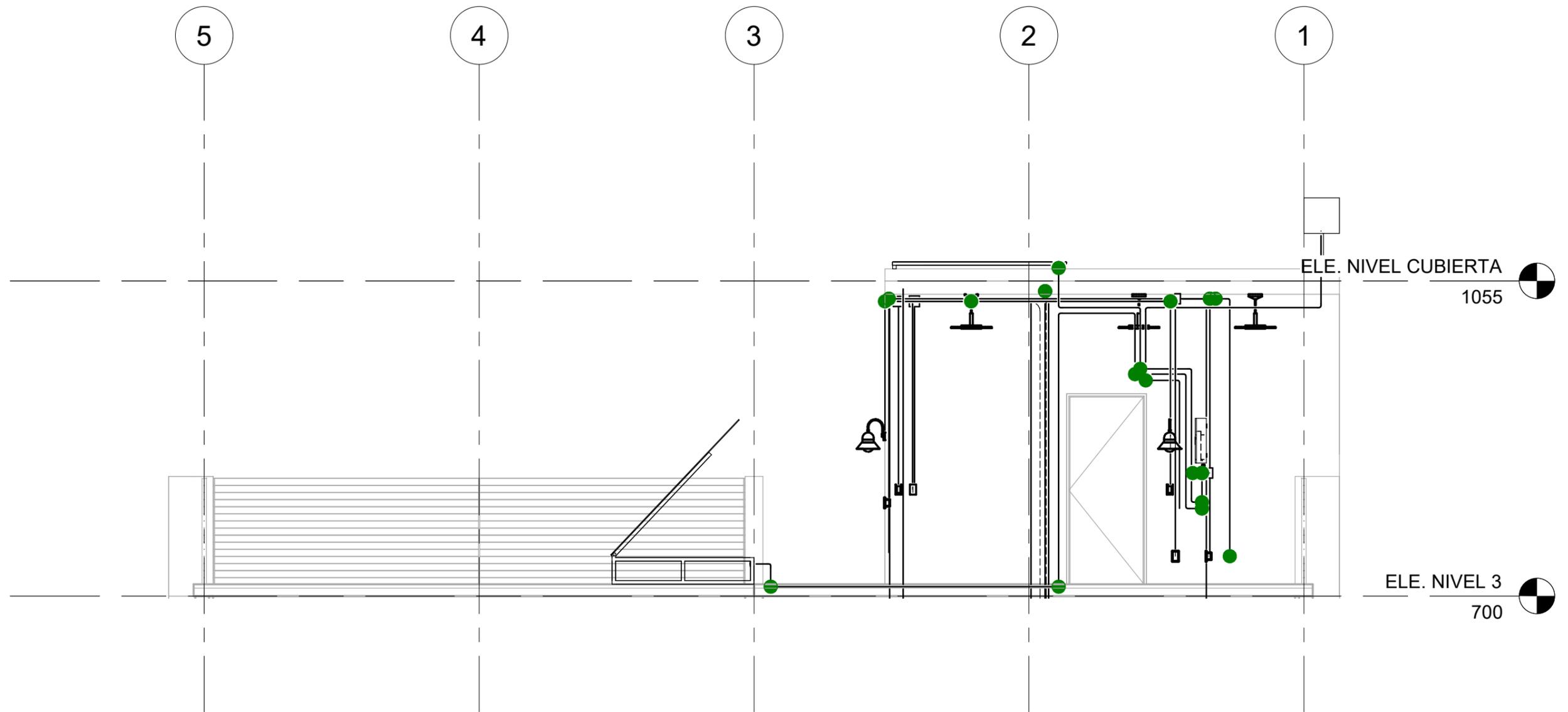
JORGE RIBERA ESPLUGUES

ESCALA:

1 : 20



 <p>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE</p>	<p>DISEÑO E INSTALACIÓN DE LABORATORIO DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA FOTOVOLTAICA EN PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE</p>	<p>PLANO:</p>	<p>PLANTA LABORATORIO EN AZOTEA IMA</p>	<p>FECHA:</p> <p>JULIO 2022</p>	<p>Nº plano:</p> <p>4</p>
		<p>AUTOR:</p>	<p>JORGE RIBERA ESPLUGUES</p>	<p>ESCALA:</p> <p>1 : 50</p>	



DISEÑO E INSTALACIÓN DE LABORATORIO  
DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA  
FOTOVOLTAICA EN PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

PLANO:

PERFIL IZQUIERDO LABORATORIO EN AZOTEA IMA

FECHA:

JULIO 2022

Nº plano:

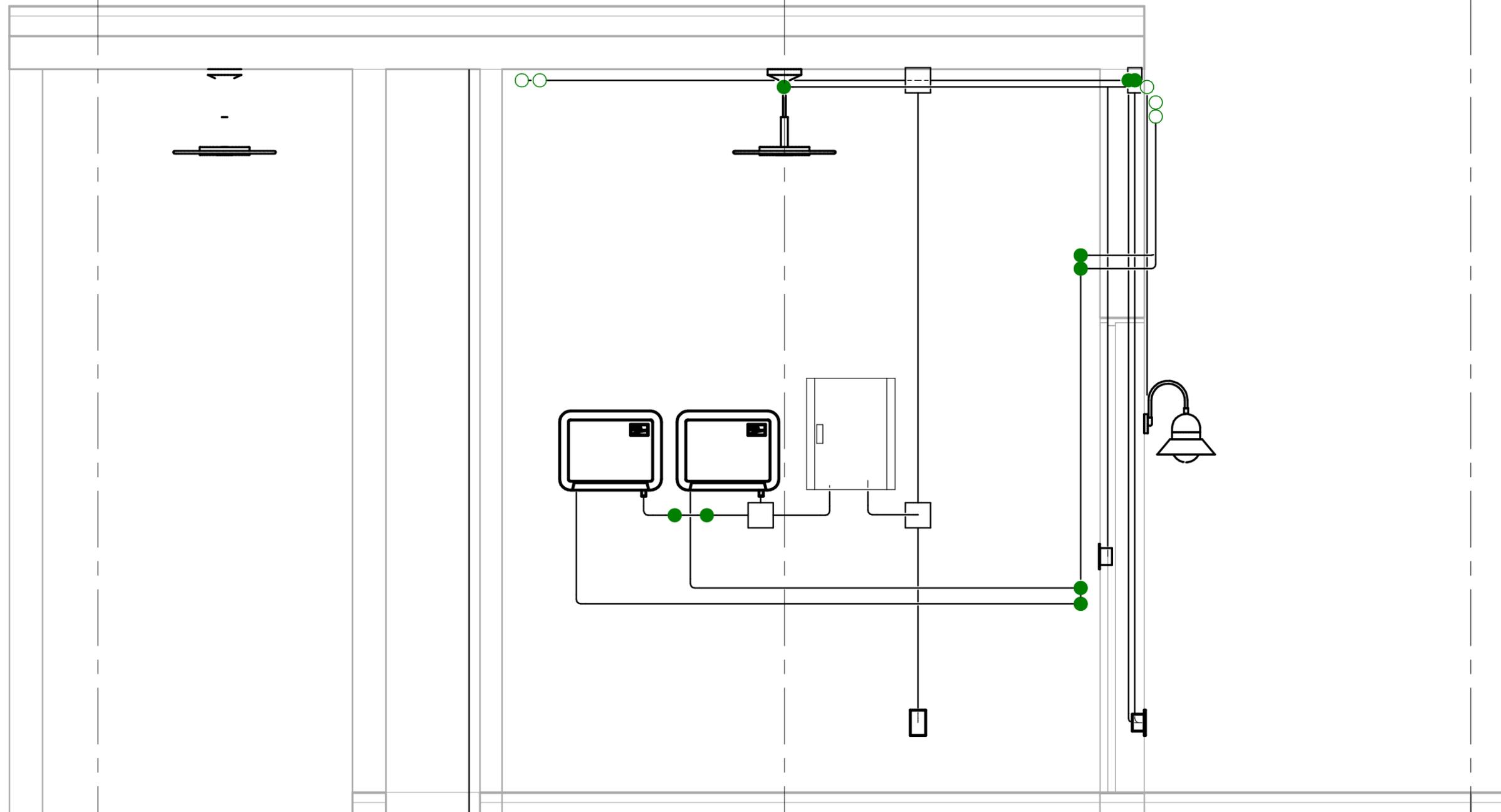
5

AUTOR:

JORGE RIBERA ESPLUGUES

ESCALA:

1 : 50



1

Section 1

1 : 20



DISEÑO E INSTALACIÓN DE LABORATORIO DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA FOTOVOLTAICA EN PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

PLANO:

VISTA SALA LABORATORIO EN AZOTEA IMA

FECHA:

JULIO 2022

AUTOR:

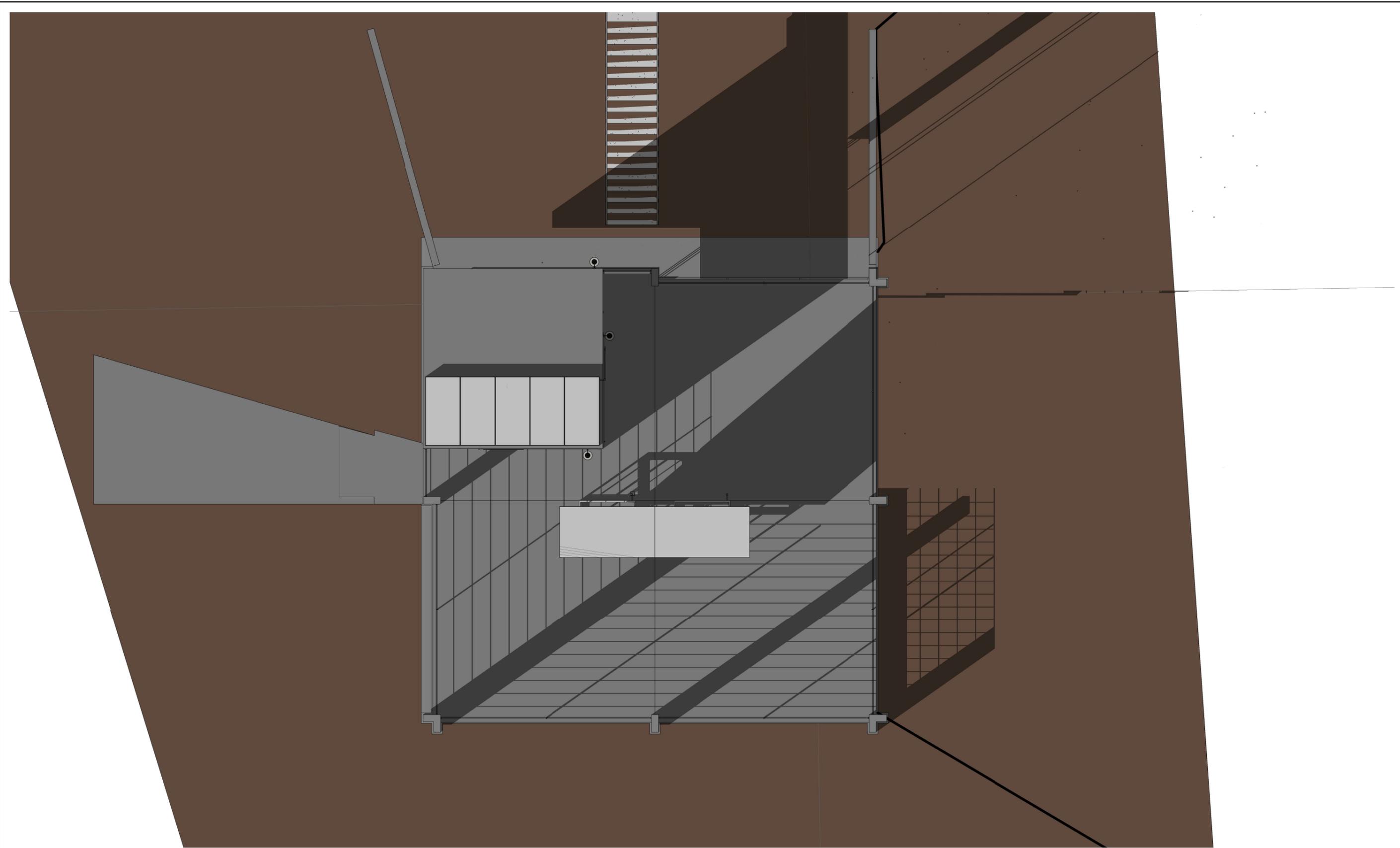
JORGE RIBERA ESPLUGUES

ESCALA:

1 : 20

Nº plano:

6

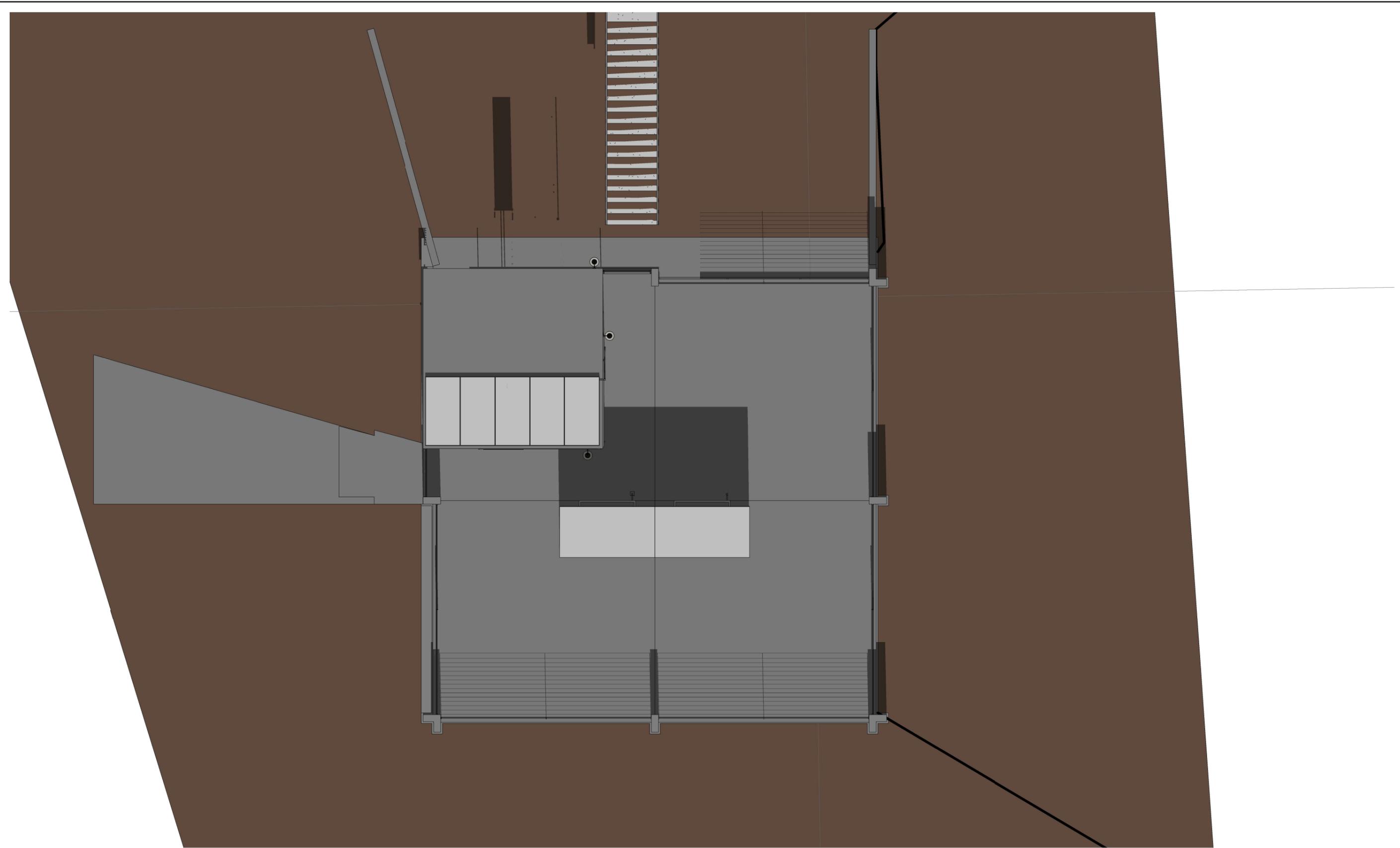


DISEÑO E INSTALACIÓN DE LABORATORIO DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA FOTOVOLTAICA EN PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

PLANO: EFECTO SOMBRAS 21 DE JUNIO A LAS 8.30h  
AUTOR: JORGE RIBERA ESPLUGUES

FECHA: JULIO 2022  
ESCALA:

Nº plano:  
7

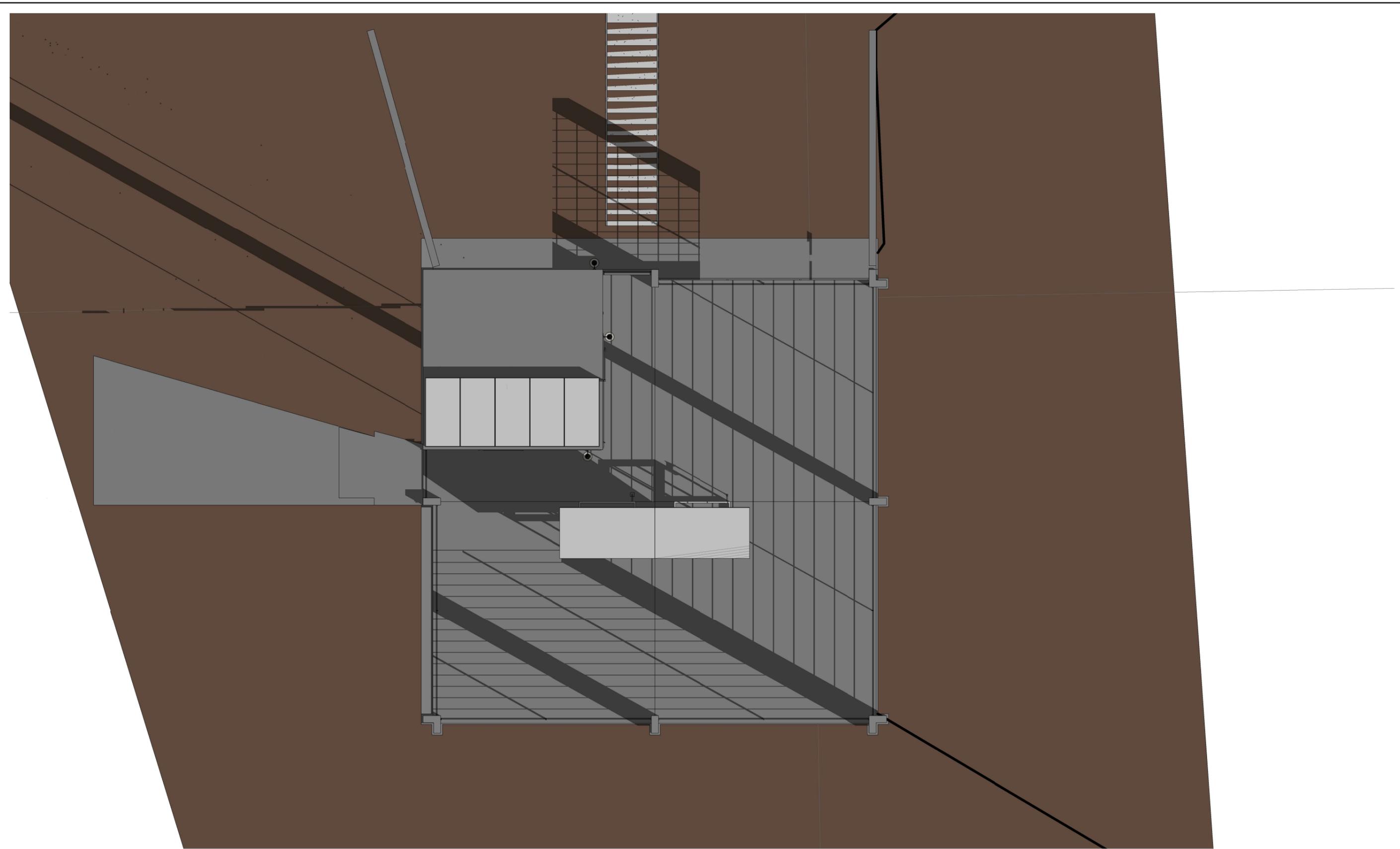


DISEÑO E INSTALACIÓN DE LABORATORIO DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA FOTOVOLTAICA EN PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

PLANO: EFECTO SOMBRAS 21 DE JUNIO 12.45h  
AUTOR: JORGE RIBERA ESPLUGUES

FECHA: JULIO 2022  
ESCALA:

Nº plano:  
8



DISEÑO E INSTALACIÓN DE LABORATORIO  
DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA  
FOTOVOLTAICA EN PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

PLANO:

EFFECTO SOMBRAS 21 DE JUNIO 17.15h

FECHA:

JULIO 2022

AUTOR:

JORGE RIBERA ESPLUGUES

ESCALA:

Nº plano:

9

