Escuela de Ingeniería
Ingeniería Civil Eléctrica

Evaluación de la Tecnología Fotovoltaica Bifacial Aplicada a Invernaderos

Hernán Guillermo Reyes Maripangui
Profesor guía: Miguel Torres

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico

Rancagua, Chile
Marzo 2022

Agradecimientos

Existen diversas personas las cuales me han apoyado toda la vida y no simplemente en este proceso, que merecen estar presente en este documento:

Principalmente mis padres y hermanos por todo el apoyo y confianza que me han brindado, soportarme día a día, lo cual – lo reconozco- no debe ser fácil debido a mi manera de ser.

Adicionalmente agradecer a todos los profesores que han sido parte en mi formación profesional, en especial a mi profesor guía Miguel Torres, quien siempre estuvo allí para cualquier consulta o inconveniente que tuviese.

A todos aquellos que me acompañaron durante el proceso de realización del proyecto en cuestión: Mis compañeros Nicolás Cordero, Marcelo Miranda, Aníbal "el jaja" Cerda, Gabriel Maureira y mi amigo de la infancia Cristóbal Aros.

No olvidar a quienes me brindaron esas buenas tardes de ocio jugando diversos juegos online para aliviar el estrés:

Rubén, Sebastián, Nicolás "El Moiano", Ignacio "El Nacho", Felipe "El Lucky", Marcelo "El Maluco", Felipe "El Diosito", José "El Pacheco", Ángelo "El Pelón", Rafael "El Rafa", Diego "El Kirin", Nader "El Chopilpin", Maximiliano "El Maxy", Jairo "El Tata", Gonzalo "El Chico", Nicolás "El Rey", Ignacio "El Campos", Cristian "El Caneo", Matías "El Chuña", Sergio "El Monroy", Samuel "El Sora", Ignacio "El Pumba", Vicente "El Jaduquen", Vicente "El Ili", Alejandro "El Drionx", " Cristian "El Peny", Marco "El Tbos", Claudio "El Tostao" y Rayen "La Rayito".

El trabajo realizado se enmarca dentro de los temas abordados por el Centro Chileno de Investigación en Energía Solar SERC-Chile ANID/FONDAP/15110019.

Índice

AGRADECIMIENTOS 1

ÍNDICE 2

RESUMEN 4

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción general 5

1.2. Objetivo general 7

1.3. Objetivos específicos 7

1.4. Alcances y limitaciones 7

1.5. Marco metodológico 7

2. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Tecnología fotovoltaica monofacial 9

2.2. Tecnología fotovoltaica bifacial 11

2.3. Comparación de tecnologías monofacial y bifacial 13

2.4. Uso de tecnología fotovoltaica en la agricultura 15

3. ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN MONOFACIAL

3.1. Consideraciones para la simulación en el explorador solar 17

3.2. Resultados de simulación 20

3.3. Cálculos de climatizadores 22

3.4. Análisis de la generación y demanda eléctrica del invernadero 25

4. COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS BIFACIAL Y MONOFACIAL

4.1. Cálculo de factor planta de un sistema bifacial 28

4.2. Ubicación geográfica 29

4.3. Comparación de un módulo bifacial vs monofacial 31

5. ESTUDIO PRACTICO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN BIFACIAL

5.1. ANÁLISIS DE GENERACIÓN PARA DISTINTAS ORIENTACIONES DEL MÓDULO BIFACIAL 34

5.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN BIFACIAL 37

5.3. INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN 39

5.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES 40

6. CONCLUSIÓN

6.1. RESUMEN 44

6.2. CONCLUSIONES 44

6.3. TRABAJO FUTURO 45

REFERENCIAS 46

ANEXOS 48

Resumen

En la actualidad existen distintas aplicaciones de la tecnología fotovoltaica convencional en la agricultura. Una de estas es la instalación de techos solares para la generación de energía eléctrica, la cual no siempre es suficiente para suplir la demanda que supone un invernadero. Es por esto por lo que es necesario estudiar otros tipos de tecnologías que permitan suplir el total de la energía requerida, como lo es la tecnología bifacial, realizando una evaluación de esta tecnología aplicada en invernaderos a través de una serie de tareas:

Estudiando en primera instancia los invernaderos fotovoltaicos ya existentes en el campus Colchagua de la Universidad de O'Higgins, realizando simulaciones y estimaciones de producción de energía utilizando la herramienta web "explorador solar". Posteriormente realizar un diseño de integración de un prototipo bifacial como pared en el invernadero, el cual una vez instalado permita analizar datos de generación reales utilizando un micro inversor y un sistema de monitoreo que recopile y registre datos de manera local y/o remota. Finalmente se realizó un análisis de los resultados experimentales del sistema para realizar una comparativa con los datos estimados por la herramienta web previamente mencionada y determinar así la viabilidad de esta tecnología en el invernadero.

Se obtuvieron resultados de potencia generada de manera discreta cada 15 min a lo largo de 7 horas, teniendo un peak de potencia a las 11:00 am de 233,84 W que decae a lo largo del día, al contrario de lo que se estipula en la teoría, en donde se evidencian 2 peaks de generación: uno por la mañana y otro por la tarde.

Palabras clave: bifacial, módulo fotovoltaico, panel solar, aplicación bifacial.

1. Introducción

Este capítulo se da contexto al documento en cuestión, presenta los objetivos generales y específicos necesarios para llevar a cabo el proyecto, da a conocer los distintos alcances y limitaciones que existieron durante el desarrollo de este y finalmente informar la metodología utilizada para la elaboración del documento y el proyecto.

1.1. Introducción general

La tecnología fotovoltaica es una alternativa de producción de energía eléctrica de manera limpia y renovable, es por esto que su uso ha ido en aumento a lo largo de los años en diversas áreas, una de estas son los sistemas agrovoltaicos. Los cuales son la combinación de actividades agrícolas y generación de energía ocurriendo de manera simultánea sobre un mismo terreno, que nacen como respuesta ante el aumento considerable de la población a nivel mundial y en consecuencia de esto la reducción de la tierra disponible, promoviendo con esto el desarrollo de una agricultura controlada y a su vez aportando generación de electricidad sin emisiones contaminantes [1].

Lo más común en los sistemas agrovoltaicos es utilizar la tecnología fotovoltaica monofacial como techos para invernaderos. Los cuales no siempre cumplen con la producción de energía necesaria que demandan estos mismos, es por esto que se debe recurrir a otras tecnologías (ya sean renovables o no) para suplir el déficit energético existente.

Una alternativa a esto es mantener un sistema fotovoltaico, pero esta vez bifacial en los muros del invernadero, de manera de aprovechar los beneficios que estos poseen. Aprovechar su aumento de generación debido a la captación de radiación por las dos caras. Otro beneficio que trae este tipo de tecnología es al instalarse de manera vertical permitiendo tener 2 peak de generación, uno por la mañana y otro por la tarde. Presentando un aumento de producción de

hasta un 30% en comparación a los sistemas monofaciales convencionales, dependiendo de su comportamiento eléctrico, estructuras de montaje y características del terreno [2].

En el presente documento se desarrolla la idea de evaluar la tecnología fotovoltaica bifacial instalada en el muro de un invernadero. La evaluación comienza con la realización de diversas simulaciones. Se realizó un balance energético de un sistema monofacial instalado como techo en un invernadero, con el fin de conocer la existencia de un déficit en este y proponer como solución la implementación de la tecnología bifacial.

Se realizó una comparación entre la tecnología bifacial instalada de manera vertical y la tecnología monofacial instalada de manera fija e inclinada, la cual permite identificar la tecnología con una generación más estable durante el año. Ya que, en un invernadero posee diversos consumos provenientes principalmente de climatizadores, los cuales funcionan durante periodos prolongados durante todos los días del año. Principalmente en invierno donde existe un mayor uso de climatizadores a lo largo del día, lo que se traduce como un mayor consumo de energía.

Una vez demostrados los beneficios de la tecnología bifacial instalada de manera vertical, se propuso un diseño de un sistema de generación bifacial acoplado al muro del invernadero fotovoltaico ubicado en el campus Colchagua de la Universidad de O'Higgins, su esquema de conexión y presupuesto de este.

Finalmente se llevó a cabo la instalación del sistema bifacial previamente mencionado para realizar y registrar mediciones de voltaje y corriente en terreno cada 15 minutos. Con estos datos registrados se realizó una curva de potencia, la cual permite realizar un análisis comparativo entre esta curva y la teoría de los módulos fotovoltaicos bifaciales instalados de manera vertical previamente descrita.

1.2. Objetivo general

Evaluar la tecnología bifacial en invernaderos mediante el análisis de datos obtenidos en terreno de manera local y/o remota, para así determinar la viabilidad de esta tecnología en invernaderos.

1.3. Objetivos específicos

- Analizar y caracterizar los invernaderos fotovoltaicos existentes en el campus Colchagua.
- Simular y estimar la producción de energía utilizando tecnología bifacial.
- Diseñar prototipo de integración bifacial como pared en el invernadero actual.
- Montar prototipo bifacial en la pared del invernadero.
- Medir variables del prototipo bifacial.
- Analizar los resultados experimentales.

1.4. Alcances y limitaciones

- Los datos de generación bifacial registrados son de manera local y cada 15 minutos.
- Los datos de generación bifacial medidos y registrados fueron a lo largo de 7 horas y en un solo día de operación.

1.5. Marco metodológico

Para lograr el objetivo general propuesto en esta memoria, se realizaron una serie actividades específicas que en conjunto lograsen satisfacer el objetivo en cuestión:

Se realizo una revisión de literatura utilizando palabras claves, sobre la tecnología fotovoltaica monofacial, tecnología fotovoltaica bifacial, sistemas agrovoltaicos y plantas bifaciales en la actualidad. Se llevo a cabo un análisis comparativo sobre las tecnologías fotovoltaicas bifaciales y monofaciales en base a artículos académicos consultados.

Luego de obtener datos teóricos se realiza un análisis de generación monofacial en un invernadero fotovoltaico para evidenciar el déficit energético existente y justificar la instalación de otra tecnología en el lugar.

Se realiza un análisis comparativo de generación fotovoltaica monofacial y bifacial mediante un caso de estudio, el cual permita demostrar mediante simulaciones la diferencia de generación entre estas 2 tecnologías.

Luego al escoger como alternativa la tecnología fotovoltaica bifacial, se realizaron distintas simulaciones en las caras del invernadero, para escoger una de estas y diseñar un sistema de integración que permita la instalación del módulo fotovoltaico y el tablero eléctrico en las instalaciones.

Se realizo la instalación de un módulo fotovoltaico bifacial en la pared de un invernadero ubicado en el Campus Colchagua de la Universidad de O'Higgins junto a su respectivo tablero eléctrico para el monitoreo de generación. Adicionalmente se realizan mediciones en terreno de las variables: voltaje de circuito abierto y corriente de cortocircuito del panel a utilizar.

Finalmente se realizó un análisis comparativo entre los datos de generación recopilados y los datos teóricos estudiados para terminar con las respectivas conclusiones.

2. Marco teórico y revisión de literatura

Este capítulo tiene como finalidad dar a conocer una recopilación de antecedentes e investigaciones previas sobre el proyecto a desarrollar. Se detalla información sobre la tecnología fotovoltaica monofacial, tecnología fotovoltaica bifacial, una comparación entre estas dos últimas y su aplicación en la agricultura.

2.1. Tecnología fotovoltaica monofacial

Esta sección tiene como finalidad introducir el concepto de la tecnología fotovoltaica y estudiar sus principales características.

El módulo fotovoltaico, también conocido como panel o placa solar es un conjunto de celdas fotovoltaicas (normalmente de silicio), que captan la energía solar y la transforman a energía eléctrica. El semiconductor de silicio tiene la característica de que sus átomos están unidos por una pareja de electrones comunes, conformando un cristal no conductor a temperaturas bajas. En la medida que sube la temperatura, se desprenden algunos de estos electrones de valencia, permitiendo una conducción eléctrica relativa. Esta conductividad aumenta con la temperatura y con la influencia de la radiación luminosa [3].

Para aumentar la conductividad de las células comerciales se emplea una estrategia conocida como dopaje, una célula fotovoltaica consiste en dos capas de silicio, una de ellas dopada positivamente (tipo p) con átomos trivalentes reduciendo así el número de electrones de valencia disponibles y otra dopada negativamente (tipo n) con átomos pentavalentes que permiten aumentar el número de electrones disponibles para la conducción eléctrica facilitando el desplazamiento de electrones liberados por el impacto de un fotón [3].

Existen distintas tecnologías para producir las capas de silicio y luego doparlas, las más comunes son:

Silicio monocristalino: Son módulos normalmente de color azul oscuro, casi negro, con células de bordes redondeados (ver Figura 1) formadas por cristales de silicio monocristalinos orientados en una misma dirección.

Este tipo de células muestran la mayor eficiencia de todas las células solares de silicio, pero la producción de los cristales de silicio monocristalino requiere una mayor inversión de fondos. En estudios de laboratorio, la eficiencia de una sola célula solar alcanza el orden del 24% y una eficiencia a gran escala del 17% [4].

Silicio policristalino: Son módulos normalmente azules (ver Figura 2) compuestos por cristales de silicio orientados de manera no uniforme, su eficiencia ronda entre el 10% y el 14% con una vida útil de 20 años.

Silicio Amorfo: Este tipo de tecnología se creó principalmente para reducir los costos asociados a la producción, pues requiere mucha menos energía que los otros procesos previamente mencionados, pero la eficiencia de las celdas no es buena (5 a 8 %) y tienden a degradarse en menos tiempo (de 5 a 8 años) [3].

Figura 1: Panel solar mono cristalino [5]

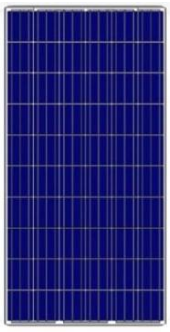


Figura 2: Panel solar policristalino [5]

Figura 3: Panel solar amorfo [5]

La generación fotovoltaica de los paneles fotovoltaicos depende directamente de la radiación que captan estos mismos. Esta radiación puede variar dependiendo del lugar de instalación, el ángulo de inclinación del panel respecto a la horizontal y la orientación del panel con respecto al norte, también llamado azimut. Esto se evidencia en la Figura 4, en donde el ángulo ϕ representa el azimut y el ángulo β representa el ángulo de inclinación.

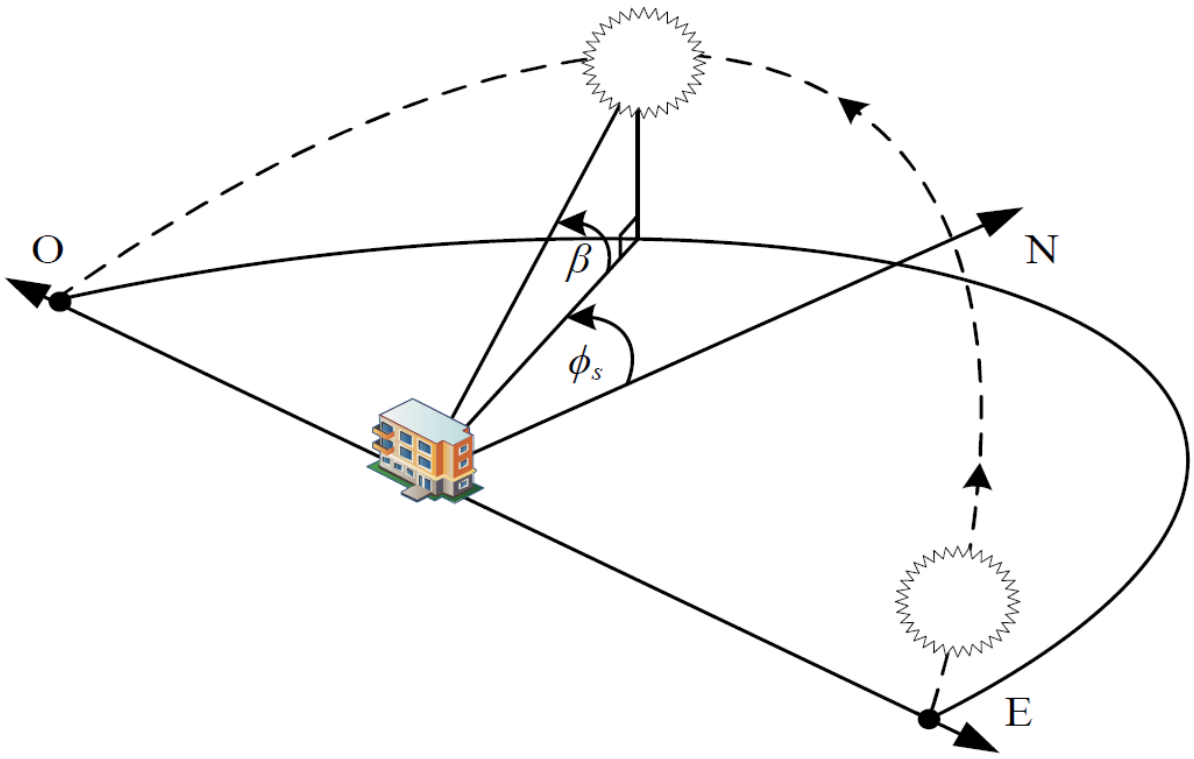


Figura 4: Representación ángulo de inclinación y azimut [6].

2.2. Tecnología fotovoltaica bifacial

Esta sección tiene como finalidad introducir el concepto de la tecnología bifacial, estudiando así:

- Las principales características de los módulos bifaciales
- Comparar esta tecnología con la convencional monofacial

2.2.1. Características principales de un módulo bifacial

En búsqueda de una mayor eficiencia energética en el mundo fotovoltaico, se crearon los módulos bifaciales que ya no solo captan energía por su lado frontal sino también que, por su lado posterior, mejorando la eficiencia energética considerablemente en comparación a los paneles convencionales.

Estos módulos aprovechan no solo la radiación directa y difusa proveniente del sol, sino que también la radiación reflejada por la superficie en donde se encuentren instalados.

2.2.2. Captación de radiación solar

La radiación proveniente del sol se ve dividida en tres componentes fundamentales, la radiación directa que es aquella que representa a la fracción de irradiancia procedente en línea recta del sol sin ningún tipo de interrupción. La radiación difusa que representa a la radiación procedente todo el cielo incluyendo los rayos dispersados por la atmósfera debido a distintas moléculas existentes en el aire como por ejemplo las nubes. Por último, la radiación reflejada o de albedo, que es aquella fracción de radiación procedente de la reflexión en el suelo y depende directamente de un coeficiente de reflexión llamado albedo. La Figura 5 muestra la interacción entre las distintas radiaciones previamente descritas y los paneles fotovoltaicos bifaciales.

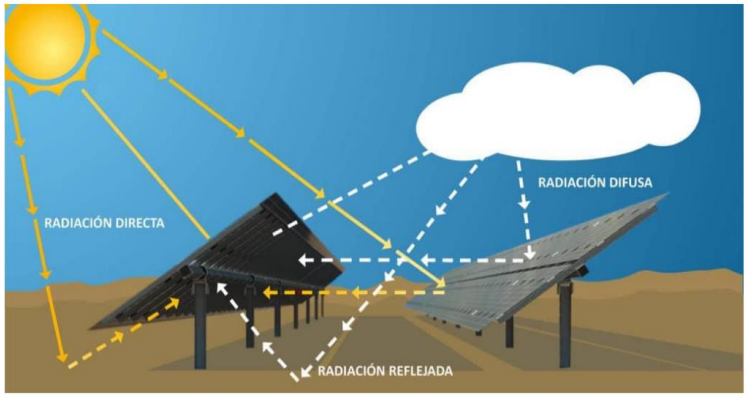


Figura 5: Interacción módulo bifacial con distintas radiaciones[7].

2.2.3. Albedo

Se define el albedo como la relación entre la potencia de la radiación reflejada por una superficie con respecto a la potencia total incidente. Este valor indica que tan bien refleja la radiación proveniente del sol una superficie y puede variar de 0% para un cuerpo idealmente negro y 100% para un cuerpo totalmente blanco.

Existen valores de albedo efectivo para diversas superficies ya conocidos, los cuales se ven indicados en la Tabla 1.

Tabla 1: Albedo en varias superficies

Superficie	Valor medio (%)
Hielo glaciar[8]	10.5
Agua[8]	9.1
Asfalto[8]	10.6
Pradera[8]	22.5
Piedra caliza[8]	26.2
Hierba verde[9]	25
Suelo desnudo[9]	17

2.3. Comparación de tecnologías monofacial y bifacial

Las celdas solares bifaciales son capaces de utilizar simultáneamente radiación por la parte frontal y posterior del dispositivo para la producción de energía eléctrica (ver Figura 6), lo que supone una ventaja clara con respecto a su contraparte, los módulos monofaciales, aumentando la producción de energía por metro cuadrado, reduciendo costos asociados al área utilizada en los sistemas fotovoltaicos. Aumentando el rendimiento de las plantas fotovoltaicas entre un 25 a un 30% (e incluso más usando soluciones reflectantes) dependiendo de su comportamiento eléctrico, estructuras de montaje y características del terreno [2].

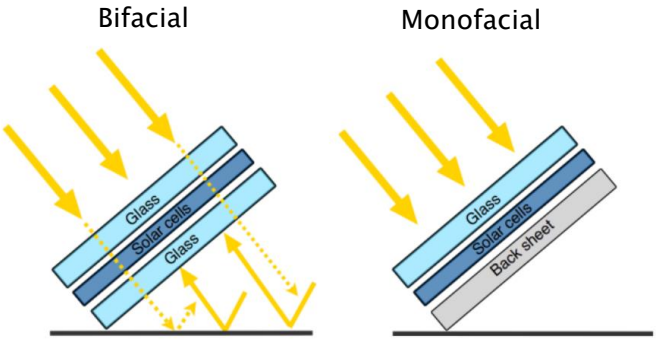


Figura 6: Diferencias panel solar Bifacial (izquierda) y monofacial (derecha) [10].

En cuanto a la diferencia de generación que supone un panel fotovoltaico bifacial con uno monofacial de las mismas características (igual potencia nominal), depende de la orientación y configuración de estos mismos:

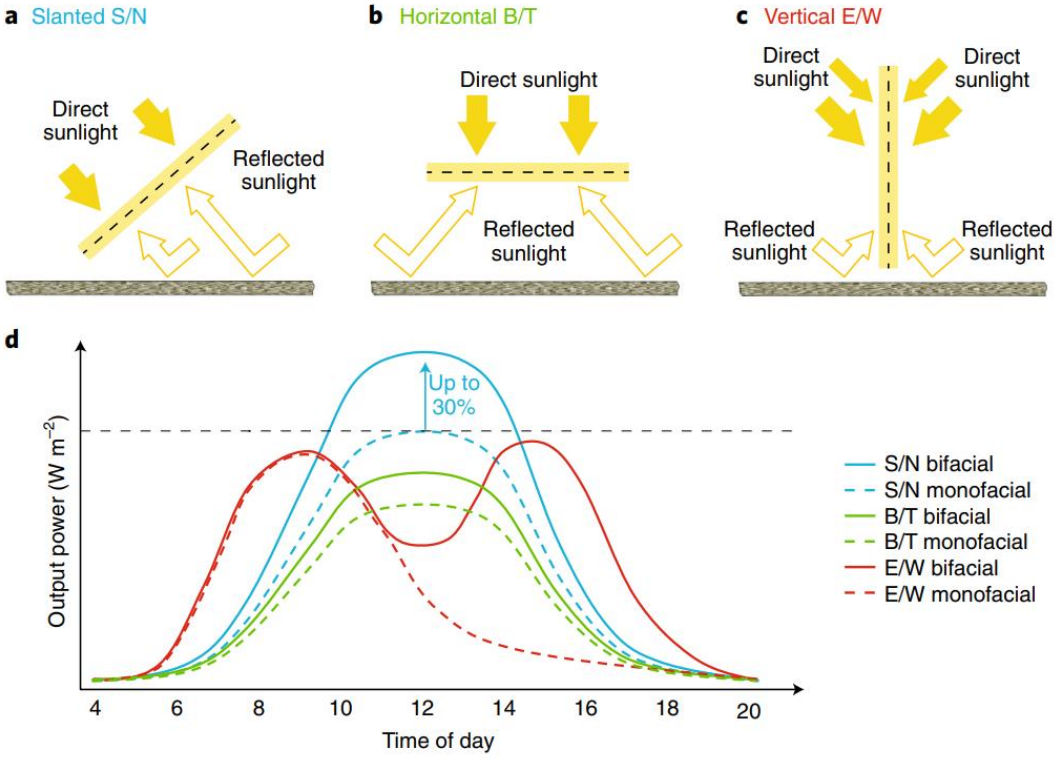


*Figura 7: **Distintas configuraciones para paneles fotovoltaicos bifaciales y monofaciales**. **a**, Módulo fijo-Inclinado orientado al Sur o Norte dependiendo del hemisferio (S/N, South/North). **b**, Módulo horizontal abajo o arriba (B/T, bottom/top). **c**, Módulo vertical Este/Oeste (E/W, East/West). **d**, Curvas de generación de energía diaria para las distintas configuraciones [11].*

En la Figura 7 se observan distintas gráficas correspondientes a diversas configuraciones de los módulos fotovoltaicos bifacial y monofacial y su comportamiento de generación a lo largo de un día. En esta figura destaca la configuración para el módulo bifacial "Vertical E/W" demarcada con una línea continua roja en la cual se evidencian 2 peak de generación a lo largo del día.

2.4. Uso de tecnología fotovoltaica en la agricultura

Se entiende como sistema agrovoltaico (AV) a la combinación de actividades agrícolas y generación de energía ocurriendo de manera simultánea sobre un mismo terreno con el fin de aprovechar la energía solar para la explotación de cultivos y generación de electricidad.

La creación de estos sistemas se presenta como una respuesta ante dos fenómenos presentes desde hace algunas décadas: el aumento considerable de la población a nivel mundial y la reducción de la tierra disponible. Además, esto promueve el desarrollo de una agricultura más controlada, al mismo tiempo que se aporta con generación de electricidad sin emisiones contaminantes [1]. Actualmente este tipo de sistemas poseen múltiples perspectivas de utilización, ya sea, directamente en invernaderos a modo de techo solar o al aire libre, como se aprecia en la Figura 8 y la Figura 9 respectivamente.

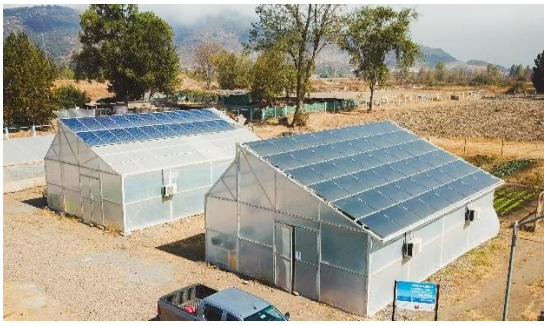


Figura 8: Invernadero APV Campus Colchagua UOH [12].

Figura 9: Fraunhofer, Planta piloto agro PV Curacaví [13].

Históricamente se ha utilizado la tecnología fotovoltaica monofacial para aplicaciones en agricultura. En los últimos años se ha visto la tendencia de investigar en el uso de nuevas tecnologías fotovoltaicas como son los paneles monofaciales semitransparentes y los paneles bifaciales.

Actualmente la empresa alemana Next2Sun implementa tecnología bifacial en instalaciones verticales para instalaciones agrícolas en distintas partes del mundo, este tipo de instalaciones permite que el sistema genere electricidad de ambos lados del panel ocupando menos espacio y actuando como un escudo contra los vientos y el sol para los cultivos agrícolas. Teniendo, así como concepto innovador un sistema fotovoltaico de espacio abierto que permite el uso dual de energía fotovoltaica y agricultura en una misma área. Otra forma de doble uso de los sistemas fotovoltaicos por parte de esta empresa, además de la producción de electricidad, es utilizar los módulos fotovoltaicos como una cerca solar bifacial que se puede utilizar para encerrar propiedades y/o edificios.

La empresa Next2Sun, inauguró en octubre del 2.020 un proyecto fotovoltaico bifacial en Donaueschingen-Aasen, al sur de Alemania. El proyecto solar es de 4,1MW y abarca un total de 14 hectáreas con un total de 11.000 módulos solares bifaciales PERT tipo n, con 380 W de potencia cada uno, teniendo un rendimiento anual esperado es alrededor de 4.850 MWh por año.

Dado que esta planta fotovoltaica es uno de los ejemplos pioneros en el mundo de la utilización de tecnología bifacial en la agricultura será utilizada como caso de estudio en el capítulo 4.

3. Análisis energético de un sistema de generación monofacial

En este capítulo se realizará el análisis energético de un invernadero fotovoltaico que utiliza paneles monofaciales semitransparentes. El análisis se realizará con el apoyo de la herramienta web explorador solar [19]. Este caso de estudio servirá de referencia para posteriormente evaluar los beneficios de la integración de tecnología bifacial en el invernadero. Cabe destacar que este invernadero está actualmente en operación en el campus Colchagua de la Universidad de O'Higgins y fue instalado gracias al financiamiento del proyecto FIC/IDI/30487884-0.

3.1. Consideraciones para la simulación en el explorador solar

Para realizar la simulación de un sistema fotovoltaico en el explorador solar es necesario ingresar una serie de datos característicos del sistema en cuestión. Para ello se debe contar de antemano con dicha información y conocer detalles técnicos de los componentes del sistema. A continuación, se presenta una serie de secciones en donde se detalla dicha información.

3.1.1. Ubicación actual

Campus Colchagua de la universidad de O'Higgins, que tiene como coordenadas:

Tabla 2: Coordenadas campus Colchagua UOH

Latitud	Longitud
-34.6118948801°	-70.98969073°

Figura 10: Vista satelital campus Colchagua UOH

3.1.2. Ángulo de inclinación y azimut

Para el cálculo del ángulo de inclinación actual se utilizó el plano de los invernaderos suministrado por el tutor, y mediante la herramienta AutoCAD, calcular dicho ángulo. Para el cálculo del azimut se utilizó la herramienta brújula de Google Maps y con esta medir la desviación con respecto al norte existente en la instalación, dando como resultado un ángulo de inclinación de 23° y un azimut de 30°.

3.1.3. Datos técnicos del módulo

En este caso se trabajó con el módulo solar del fabricante YINGLI SOLAR modelo YL270P-29B, cuya hoja de datos se presenta en el Anexo 1. Obteniendo los datos de potencia nominal de 270 W, eficiencia de 16,5%, un coeficiente de temperatura de -0,42%/°C. El panel solar es de 1650 mm de largo por 992 mm de ancho.

3.1.4. Arreglo fotovoltaico

Otro de los datos solicitados por el explorador solar es la capacidad instalada, y para saber eso es necesario realizar los cálculos correspondientes a la cantidad de módulos que se ubicaran en una superficie determinada. En este caso la superficie corresponde al techo del invernadero ubicado en el campus Colchagua de la Universidad de O'Higgins, el cual posee las dimensiones visibles en la Figura 11 y la Figura 12.

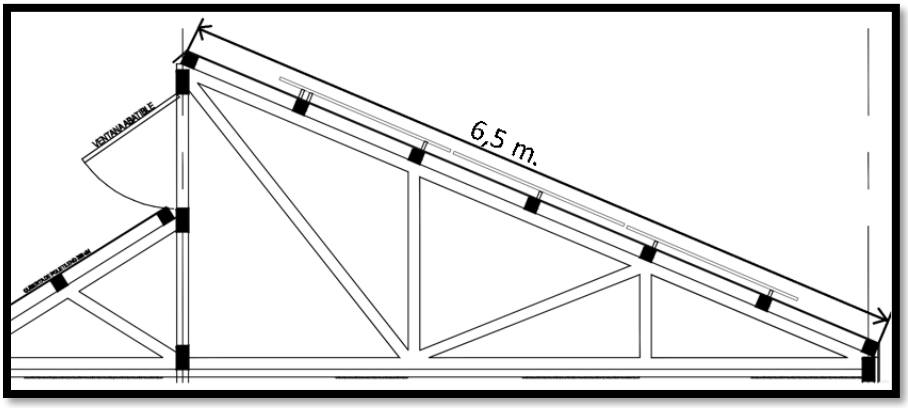


Figura 11: Ancho del techo (Vista lateral).

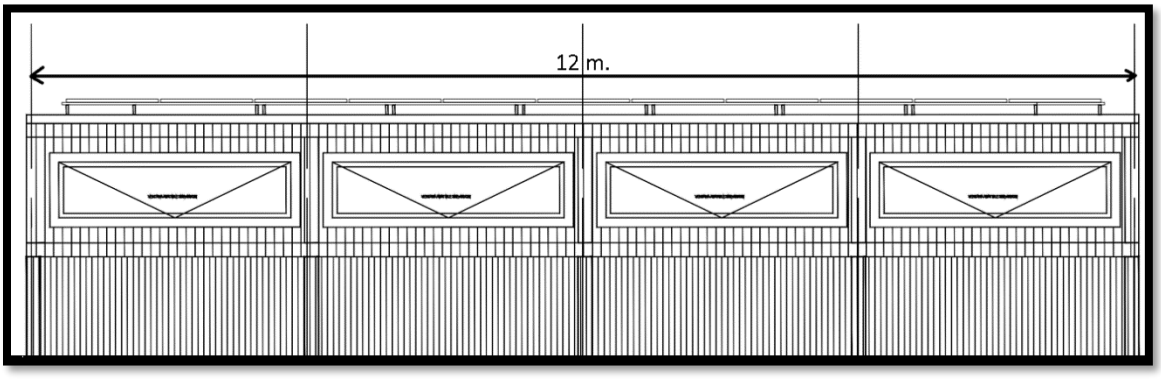


Figura 12: Largo del techo (Vista frontal).

Conociendo las dimensiones del techo del invernadero y las del módulo fotovoltaico a utilizar se obtuvo el arreglo fotovoltaico presente en la Figura 13 con un total de 33 módulos fotovoltaicos.

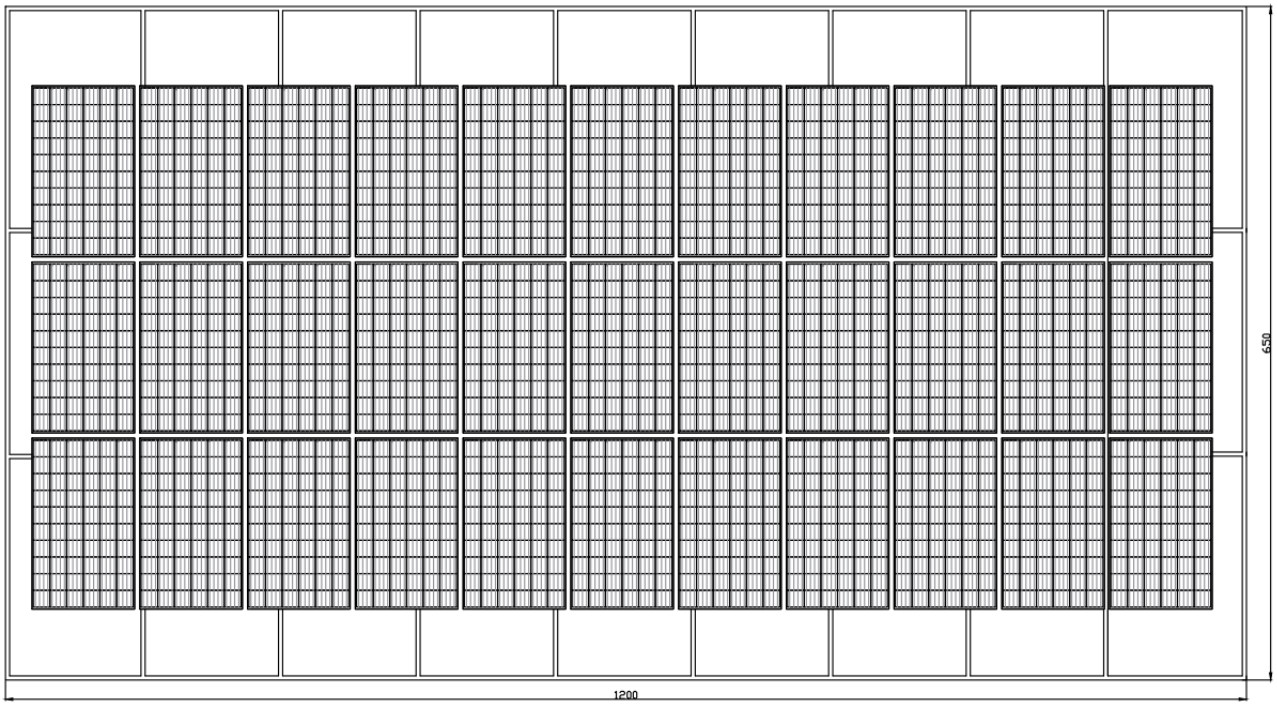


Figura 13: Vista aérea del área con el arreglo fotovoltaico sugerido.

3.1.5. Capacidad y eficiencia del inversor

En este caso se trabajó con 2 inversores del fabricante SMA Solar modelo SB 5.0-1AV-40, cuya hoja de datos se presenta en el Anexo 2, obteniendo que la capacidad del inversor es de 5250 W y una eficiencia de 97%.

3.2. Resultados de simulación

El explorador solar entrega una serie de resultados que caracterizan la operación y producción de energía eléctrica del sistema simulado. Esta sección se enfoca en los resultados de generación eléctrica y el mapa de temperaturas del lugar. Con los datos anteriormente mencionados se realizará el cálculo del consumo eléctrico de los climatizadores del invernadero y posteriormente un balance energético producción vs demanda eléctrica.

Utilizando los parámetros obtenidos en la sección anterior se obtuvieron los resultados de generación visibles en la Tabla 3 y el mapa de temperaturas que se observa en la Tabla 4.

Tabla 3: Generación del arreglo fotovoltaico a lo largo de un día [19].

	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Ene	0	0	0	0	0	0	0,01	0,22	1,19	2,80	4,18	5,20	5,84	6,05	5,95	5,46	4,60	3,40	1,92	0,46	0	0	0	0
Feb	0	0	0	0	0	0	0	0,13	0,90	2,47	3,91	4,98	5,66	5,94	5,86	5,42	4,55	3,32	1,83	0,36	0	0	0	0
Mar	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,72	2,21	3,60	4,70	5,30	5,56	5,41	4,92	4,11	2,86	1,39	0,01	0	0	0	0
Abr	0	0	0	0	0	0	0	0	0,50	1,69	2,78	3,70	4,10	4,50	4,45	4,08	3,21	2,04	0,38	0	0	0	0	0
May	0	0	0	0	0	0	0	0	0,18	0,99	1,79	2,48	2,90	3,20	3,12	2,87	2,18	1,51	0	0	0	0	0	0
Jun	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,68	1,32	1,88	2,46	2,78	2,77	2,72	2,07	1,25	0	0	0	0	0	0
Jul	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,69	1,43	2,10	2,42	2,72	2,83	2,64	2,08	1,64	0	0	0	0	0	0
Ago	0	0	0	0	0	0	0	0	0,24	1,13	1,98	2,66	3,03	3,19	3,20	2,89	2,33	1,56	0,13	0	0	0	0	0
Sept	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,68	1,87	2,90	3,67	4,03	4,26	4,07	3,71	2,88	1,78	0,80	0	0	0	0	0
Oct	0	0	0	0	0	0	0,00	0,23	1,26	2,54	3,59	4,38	4,81	4,78	4,53	4,02	3,19	2,01	1,01	0,00	0	0	0	0
Nov	0	0	0	0	0	0	0,07	0,39	1,68	3,13	4,28	5,10	5,52	5,66	5,41	4,77	3,86	2,58	1,15	0,07	0	0	0	0
Dic	0	0	0	0	0	0	0,08	0,34	1,57	3,08	4,35	5,25	5,77	5,90	5,64	5,12	4,25	3,02	1,56	0,28	0	0	0	0

Tabla 4: Temperatura ambiente del invernadero a lo largo de un día [19].

	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Ene	17,7	16,9	16,2	15,6	15,0	14,3	13,8	14,3	15,5	17,2	19,4	21,8	24,1	26,0	27,6	28,6	28,9	28,1	26,8	24,8	22,7	21,1	19,9	18,7
Feb	17,3	16,5	15,7	15,1	14,5	13,9	13,2	13,3	14,5	16,2	18,5	20,9	23,2	25,2	26,7	27,8	28,3	27,5	26,0	23,8	22,0	20,5	19,4	18,3
Mar	15,5	14,7	13,9	13,2	12,6	11,9	11,2	11,0	12,2	14,0	16,2	18,7	21,1	23,1	24,7	25,9	25,8	25,0	23,2	21,1	19,6	18,4	17,3	16,3
Abr	11,9	11,3	10,7	10,1	9,7	9,2	8,7	8,3	8,9	10,4	12,3	14,6	16,7	18,6	20,0	20,9	20,8	19,8	17,7	16,3	15,1	14,2	13,3	12,5
May	9,3	8,9	8,6	8,3	7,9	7,6	7,2	6,7	6,5	7,5	8,9	10,9	12,6	14,2	15,3	15,9	15,9	14,6	13,3	12,3	11,6	10,8	10,2	9,7
Jun	7,3	7,0	6,7	6,5	6,3	6,1	5,9	5,7	5,6	6,2	7,1	8,4	9,8	11,0	12,0	12,3	12,3	11,1	10,1	9,4	8,8	8,4	8,0	7,6
Jul	6,7	6,3	6,1	5,8	5,6	5,4	5,1	4,8	4,8	5,6	6,6	8,1	9,6	11,0	11,9	12,3	12,3	11,1	10,0	9,1	8,5	8,0	7,5	7,1
Ag	7,7	7,3	6,9	6,5	6,2	5,9	5,7	5,3	5,7	6,7	8,0	9,7	11,4	12,8	13,7	14,2	14,1	13,3	11,8	10,8	9,9	9,4	8,8	8,3
Sept	9,7	9,2	8,7	8,2	7,7	7,3	6,8	6,6	7,2	8,4	10,2	12,3	14,1	15,6	16,7	17,4	17,3	16,7	15,1	13,6	12,6	11,7	11,0	10,3
Oct	11,5	10,8	10,3	9,8	9,3	8,8	8,3	8,5	9,4	10,9	13,0	15,2	17,1	18,6	19,8	20,4	20,4	19,7	18,4	16,5	15,1	13,9	13,0	12,2
Nov	13,5	12,7	12,1	11,5	11,0	10,5	10,1	10,5	11,7	13,5	15,9	18,3	20,5	22,2	23,5	24,3	24,3	23,4	22,1	19,9	18,0	16,5	15,4	14,5
Dic	15,8	15,0	14,3	13,6	12,9	12,3	11,8	12,4	13,5	15,2	17,5	20,0	22,3	24,2	25,7	26,8	27,0	26,4	25,1	23,1	21,0	19,2	18,0	16,9

3.3. Cálculos de climatizadores

Existen muchos factores que se deben considerar para el cálculo de climatizadores, algunos de estos factores son:

- Tamaño de la habitación.
- Número de ventanas en la habitación.
- Tipo de aislamiento en el techo.
- Altura del techo.
- Transferencia de calor de paredes.
- Temperaturas medias y máximas de verano.
- Color y tipo de techo.

Para realizar el cálculo correspondiente a la cantidad de climatizadores necesarios para el invernadero, se consideró exclusivamente el área de la habitación con el largo y ancho, dando como resultado $96\ \mathrm{m}^2$.

Una vez obtenida el área, se debe tener en consideración una constante que depende del tipo de habitación en donde se instalarán los aires acondicionados en cuestión, siendo esta constante de 600 para un ambiente comercial y 800 para un ambiente residencial [15]. Se consideró como constante el promedio entre estos dos tipos de ambientes, debido a que no existe un flujo constante de personas como lo sería en un ambiente comercial. Pero de igual manera existe un pequeño flujo de personas que diariamente circulan en el invernadero para su mantención; teniendo así una constante de 700.

Una vez obtenidos estos datos, se obtiene la cantidad de BTU (British thermal unit) necesarios multiplicando el área por la constante previamente señalada, dando como resultado 67.200 BTU. El equipo escogido es el aire acondicionado Split muro inverter Khone KSM-18BC1,

el cual tiene una capacidad de 18.000 BTU, una potencia consumida al enfriar de 1.696 W y una potencia consumida al calentar de 1.464 W. Debido a las características del aire, se propone la instalación de 4 equipos suministrando una capacidad total de 72.000 BTU, cumpliendo con la demanda previamente señalada.

3.3.1. Funcionamiento del climatizador

Para estimar en qué horarios debe funcionar el aire acondicionado, se consideró que la temperatura del invernadero debe variar entre los 14 y 28 grados Celsius [16].

Teniendo esto en cuenta esto y considerando la Tabla 4 correspondiente a la temperatura ambiente del lugar de instalación, es posible determinar cuándo es necesario el funcionamiento de los equipos de climatización en modo frio o calor. Una vez obtenidas las horas en las que debe operar el equipo, se realizó la Tabla 5, que indica el consumo según la hora del día en los distintos meses del año.

Se estima un consumo aproximado de 5,8 kWh por cada hora de funcionamiento en conjunto de los 4 aires acondicionados en modo calefacción, pero debido a que no siempre estarán en funcionamiento durante toda la hora que se estima, se redujo este consumo a la mitad, teniendo un consumo representativo de 2,9 kWh por hora de uso.

De igual manera cuando los 4 aires acondicionados trabajen en modo enfriamiento, se estima un consumo aproximado de 6,8 kWh, por lo que se tiene un consumo representativo de 3,4 kWh por hora de operación.

Tabla 5: Consumo climatizadores a lo largo de un día.

	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Ene	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	3,4	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Feb	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	2,9	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mar	0,0	0,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ab	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	2,9
May	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
Jun	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,93	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
Jul	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
Ago	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	0,0	0,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
Sept	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
Oct	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	2,9	2,9
Nov	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Dic	0,0	0,0	0,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Climatizador en modo calefacción. Climatizador en modo enfriamiento

3.4. Análisis de la generación y demanda eléctrica del invernadero

Con los datos de generación eléctrica y de consumo por parte de los climatizadores obtenidos en la Tabla 3 y la Tabla 5 respectivamente se realizaron las gráficas correspondientes a un mes representativo por cada estación del año para determinar si la generación del arreglo fotovoltaico es suficiente para suplir la demanda correspondiente a los climatizadores.

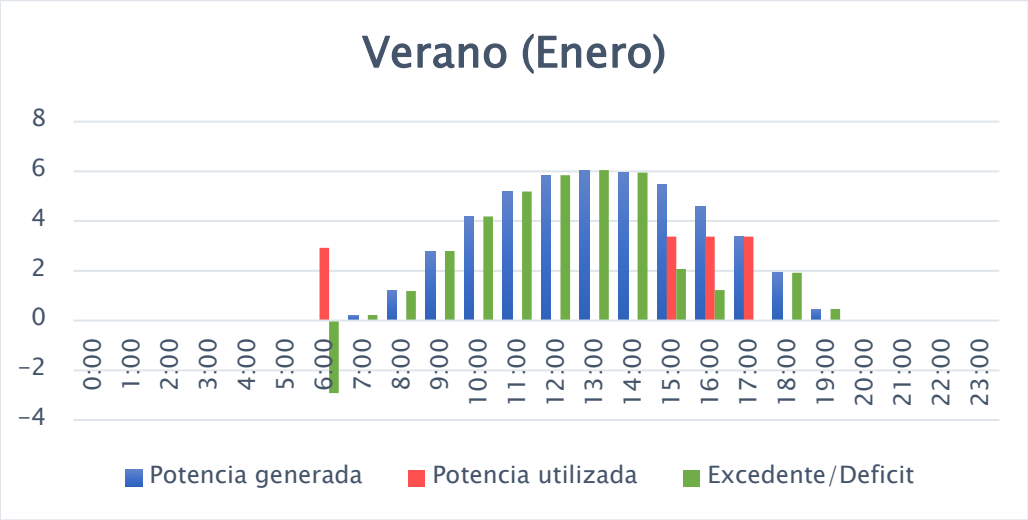


Figura 14: Gráfica potencia generada por el arreglo fotovoltaico, potencia consumida por los climatizadores y excedente/déficit de generación en verano.

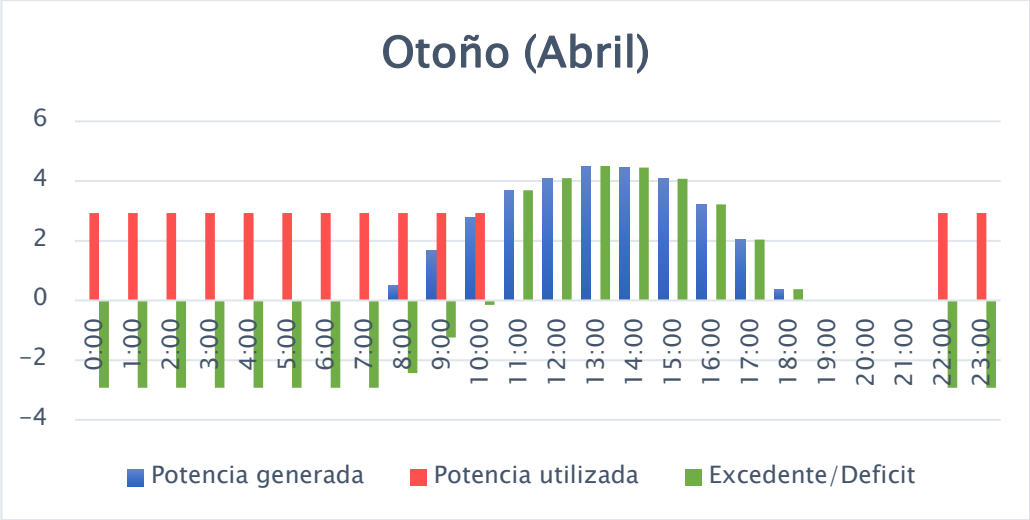


Figura 15: Gráfica potencia generada por el arreglo fotovoltaico, potencia consumida por los climatizadores y excedente/déficit de generación en otoño.

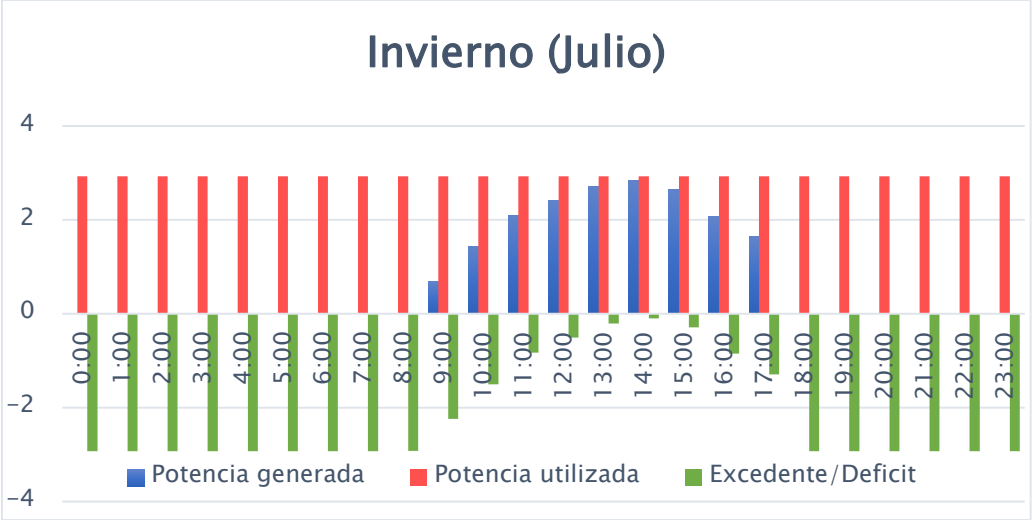


Figura 16: Gráfica potencia generada por el arreglo fotovoltaico, potencia consumida por los climatizadores y excedente/déficit de generación en invierno.

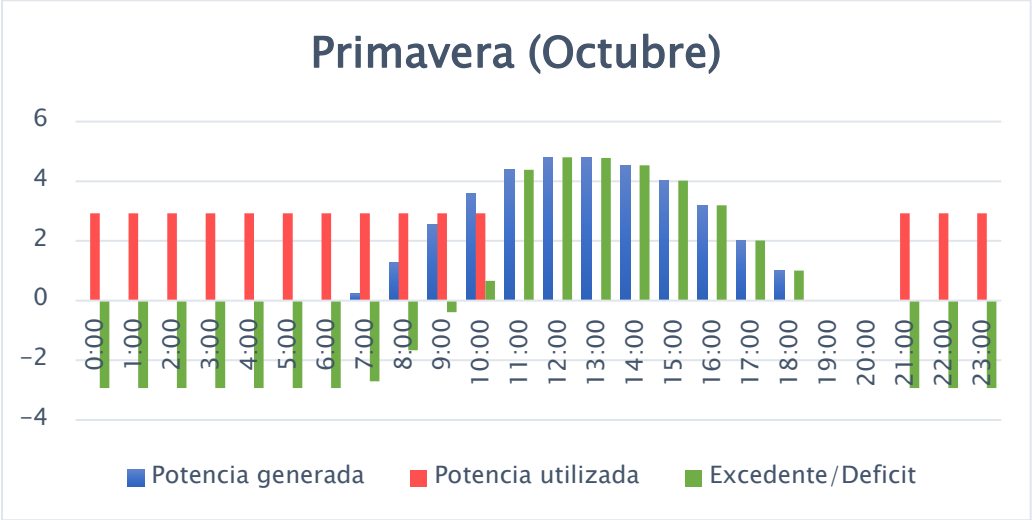


Figura 17: Gráfica potencia generada por el arreglo fotovoltaico, potencia consumida por los climatizadores y excedente/déficit de generación en primavera.

En la Figura 14, Figura 15, Figura 16 y la Figura 17 se muestra en color azul la potencia generada por el arreglo fotovoltaico, en rojo la potencia consumida por parte de los aires acondicionados y en verde el excedente de generación (valores positivos) o el déficit (valores negativos) de generación durante distintos meses representativos por cada estación del año.

De la Figura 14 se puede concluir que en verano la generación eléctrica por parte del arreglo fotovoltaico es suficiente para suplir en gran parte el consumo de los aires acondicionados y en las horas que existe un déficit de potencia generada, puede solucionarse mediante un banco de baterías que permita almacenar la potencia generada en exceso.

Tanto en la Figura 15, correspondiente al mes representativo de otoño, como en la Figura 17, correspondiente al mes representativo de primavera, se puede apreciar que la generación eléctrica por parte del arreglo fotovoltaico es insuficiente para suplir el consumo de los aires acondicionados en gran parte de las horas del día. Si existiese un banco de baterías para almacenar la energía generada en las horas donde no existe consumo, de igual manera no sería suficiente para suplir todo el consumo por parte de los aires acondicionados, por lo que es recomendable en el caso de ser un sistema aislado de la red eléctrica, recurrir a otros medios de generación para suplir este déficit y en el caso de que sea un sistema conectado a la red nacional de energía, este déficit supondría un mayor gasto económico durante algunos meses.

De la Figura 16 se puede concluir que en invierno la generación eléctrica por parte del arreglo fotovoltaico es insuficiente para suplir el consumo de los aires acondicionados durante todas las horas del día, esto se debe a la poca irradiancia existente durante los meses de invierno, lo que se traduce a una poca generación por parte del arreglo. De ser un sistema totalmente aislado de la red eléctrica, es recomendable recurrir a otros medios de generación para suplir el déficit de generación existente durante estos meses. En el caso de ser un sistema conectado a la red nacional de energía, este déficit supondría un mayor gasto económico durante estos meses.

Al analizar las distintas figuras correspondientes a las diferencias de potencia consumida vs generada en las distintas estaciones del año, se aprecia que la energía generada por el arreglo fotovoltaico diseñado no siempre es suficiente para suplir la demanda correspondiente al invernadero. Es por esto por lo que nace la idea de utilizar otro tipo de tecnología adicional en los invernaderos para suplir este déficit.

4. Comparación de tecnologías bifacial y monofacial

En este capítulo se realiza el cálculo del factor planta de un sistema bifacial de la empresa Next2Sun ubicada al sur de Alemania, para utilizarlo como referencia en un sistema que se encuentra actualmente en operación. Seguidamente se determina una ubicación geográfica con condiciones de irradiancia similares a la ubicación del sistema previamente descrito. Posteriormente se realiza un análisis comparativo de la generación eléctrica de este módulo bifacial vs un módulo monofacial. Cabe destacar que esta comparación es importante puesto que permite entender de mejor manera las diferencias entre ambas tecnologías y como estas pueden complementarse para su uso en invernaderos.

4.1. Cálculo de factor planta de un sistema bifacial

El factor planta es un índice de mérito el cual indica la relación entre la electricidad neta generada, durante un tiempo considerado, y la energía que podría haberse generado en operación continua a plena potencia durante el mismo período [18]. Por consiguiente, el factor planta puede utilizarse para comparar el rendimiento de distintas tecnologías de generación. A continuación, se calculará el factor planta del sistema bifacial de la empresa Next2Sun para utilizarlo como valor de referencia de un sistema en actual operación.

Teniendo en cuenta el arreglo fotovoltaico de esta empresa, una potencia nominal por módulo de 380 W, una cantidad de 11.000 módulos instalados y un rendimiento anual esperado de 4.850 MWh.

Primero se calculan los kWh anuales esperado por módulo, dividiendo el rendimiento anual esperado por la cantidad de módulos instalados, dando como resultado 441 kWh. Con este valor anual ya disponible, es posible calcular la generación mensual esperada por módulo, dividiendo el valor anual por la cantidad de meses en un año, obteniendo así una generación mensual esperada de 36,75 kWh.

Para obtener la generación mensual máxima se debe considerar la potencia nominal de un panel (0,38 kW) multiplicado por las horas en un mes (720), dando como resultado 273,6 kWh.

Finalmente se procede a calcular el factor planta de la instalación estudiada, el cual indica la relación entre la electricidad neta generada, durante un tiempo considerado, y la energía que podría haberse generado en operación continua a plena potencia durante el mismo período [18].

$$Factor\ planta = \frac{Generacion\ mensual\ esperada}{Generacion\ mensual\ maxima} * 100\% \quad (1)$$

Reemplazando en (1):

$$Factor\ planta = \frac{36{,}75}{273{,}6} * 100\% = 13\%$$

4.2. Ubicación geográfica

Luego de obtenido el factor planta anterior es necesario encontrar una ubicación geográfica en Chile que tenga niveles de irradiación similar a los encontrados en Donaueschingen. De esta manera se podrá utilizar la herramienta web explorador solar para realizar la comparación de tecnologías bifacial y monofacial, teniendo como referencia el factor planta de 13% calculado previamente.

Mediante la herramienta web Global solar atlas, se realizó la medición de la radiación presente en la ubicación del proyecto de la empresa Next2Sun ubicado en Donaueschingen, como se observa en la Figura 18.

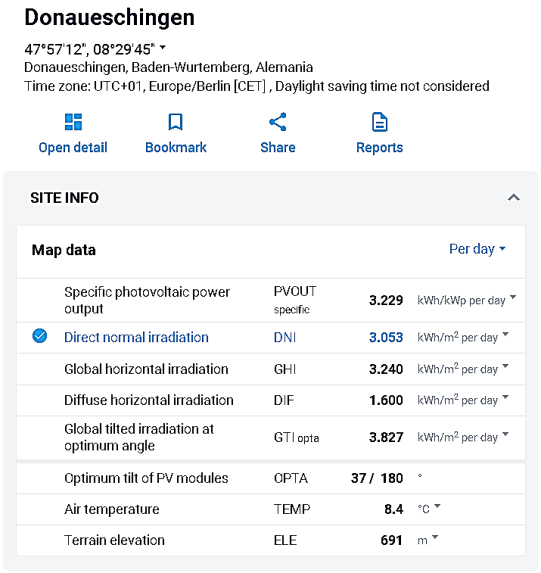


Figura 18: Información irradiación Donaueschingen[17].

Una vez estudiado los datos de irradiancia presente en el lugar, se utilizó la herramienta explorador solar, para estimar un lugar con condiciones similares ubicadas en Chile. La ubicación encontrada es Ancud, Chiloé y sus datos de generación se muestran en la Figura 19 .

LATITUD	LONGITUD	ALTURA
-42,80°	-73,80°	104 msnm

RADIACIÓN ANUAL

Global Horizontal (kWh/m²/día)	Global Inclinado 42° (kWh/m²/día)	Directa Normal (kWh/m²/día)	Difusa Horizontal (kWh/m²/día)
3,25	3,47	3,25	1,63

INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

Frecuencia de Nubes (%)	Temperatura Ambiental (°C)	Velocidad del viento (m/s)
32	10,0	3,4

Figura 19: Información irradiación en Ancud, Chiloé [19].

4.3. Comparación de un módulo bifacial vs monofacial

Para realizar la comparación se simulará en el explorador solar la producción eléctrica de un módulo monofacial y un módulo bifacial ubicados en la localidad de Ancud, Chiloé.

4.3.1. Simulación módulo monofacial

Para la simulación del módulo monofacial se utilizó un módulo fotovoltaico monocristalino modelo UL-380M-72 del fabricante Ulica solar, cuya hoja de datos se muestra en el Anexo 4, obteniendo lo siguiente:

$$Potencia\ nominal = \ 380\ W$$
$$Coeficiente\ de\ temperatura = \ -0{,}39\ \%/°C$$

Adicionalmente, es necesario especificar el tipo de arreglo, tipo de montaje y calcular el ángulo de inclinación y azimut óptimos en el explorador solar:

$$Tipo\ de\ arreglo: Fijo\ inclinado$$
$$Tipo\ de\ montaje: Estructura\ aislada$$
$$Inclinacion: 32°$$
$$Azimut: \ -22°$$

Obteniendo así los siguientes resultados de generación fotovoltaica:

$$Total\ diario: 0{,}99\ kWh$$
$$Total\ anual: 361\ kWh$$
$$Factor\ de\ planta: 11\ \%$$

Adicionalmente se obtiene un gráfico de generación fotovoltaica mensual promedio a lo largo de un año, el cual se aprecia en la Figura 20.

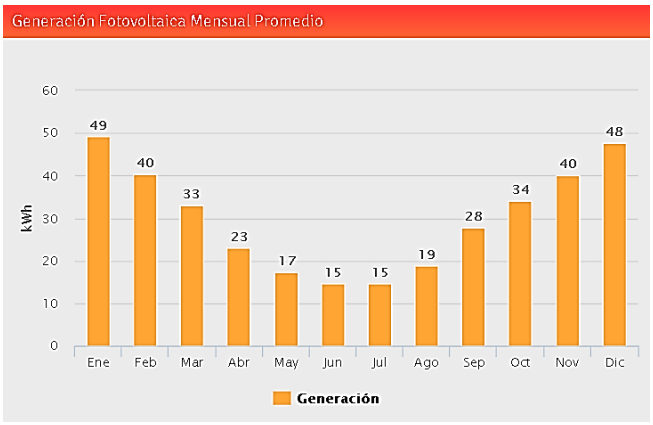


Figura 20: Generación fotovoltaica mensual promedio modelo monofacial [19].

4.3.2. Simulación módulo bifacial

Para la simulación del módulo bifacial se utilizó un módulo fotovoltaico monocristalino bifacial modelo JAM72D09-380/BP del fabricante JA solar, cuya hoja de datos se presenta en el Anexo 5, obteniendo una potencia nominal de 380 W, un coeficiente de temperatura de -0,34%/°C y un factor de bifacialidad de 0,7.

Es importante destacar que se considera un ángulo de inclinación de 90° que corresponde a una disposición vertical, lo que simulan el montaje de este módulo como un muro del invernadero; y se mantuvo el mismo azimut optimo calculado anteriormente de -22°. Obteniendo así los siguientes resultados de generación fotovoltaica:

$$Total\ diario: 1{,}04\ kWh$$
$$Total\ anual: 379\ kWh$$
$$Factor\ de\ planta: 11\ \%$$

Adicionalmente se obtiene un gráfico de generación fotovoltaica mensual promedio a lo largo de un año del módulo bifacial, presentado en la Figura 21.

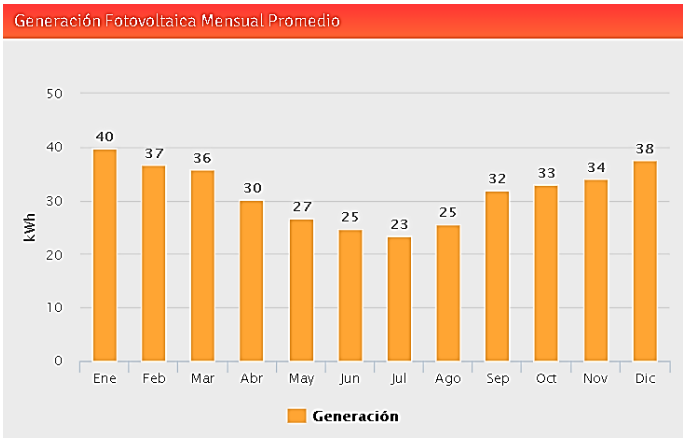


Figura 21: Generación fotovoltaica mensual promedio modelo bifacial [19].

De las simulaciones realizadas anteriormente (ver figura 22 y 23) se observa que a pesar de que el módulo fotovoltaico monofacial se encuentra en sus condiciones óptimas de generación, la generación fotovoltaica mensual promedio en los meses de verano es mayor para el módulo fotovoltaico monofacial. Además, se puede concluir que la generación promedio estimada para el módulo bifacial totalmente vertical es más estable a lo largo del año teniendo una mayor generación anual.

5. Estudio practico de un sistema de generación bifacial

En este capítulo se realiza un estudio practico de un sistema de generación bifacial, realizando un análisis de generación para distintas orientaciones del módulo bifacial en cada uno de los muros de un invernadero ubicado en el Campus Colchagua de la Universidad de O'Higgins. Además, se realiza un diseño del sistema de generación bifacial, tanto del muro fotovoltaico, el esquema de conexión y el presupuesto que supone esto. Se desarrolla la instalación del sistema de generación y se muestran y analizan los resultados experimentales obtenidos.

5.1. Análisis de generación para distintas orientaciones del módulo bifacial

Se estudia el comportamiento de generación de un módulo fotovoltaico bifacial modelo LR6-60BP del fabricante LONGI Solar, cuya hoja de datos se presenta en el Anexo 6, obteniendo los datos de potencia nominal de 300 W, coeficiente de temperatura de -0,38%/°C y un factor de bifacialidad, definido como el cociente entre la eficiencia de conversión de potencia cuando la luz entra por la cara posterior y cuando entra por la cara superior[20], de 0,75.

Se realizaron simulaciones de tal manera que el módulo se encontrase instalado de forma vertical en los distintos muros de un invernadero ubicado en el campus Colchagua de la universidad de O'Higgins. Se considera que el ángulo de inclinación será de 90°, simulando una pared y el azimut varía según la orientación del muro, como se puede apreciar en la Figura 22.

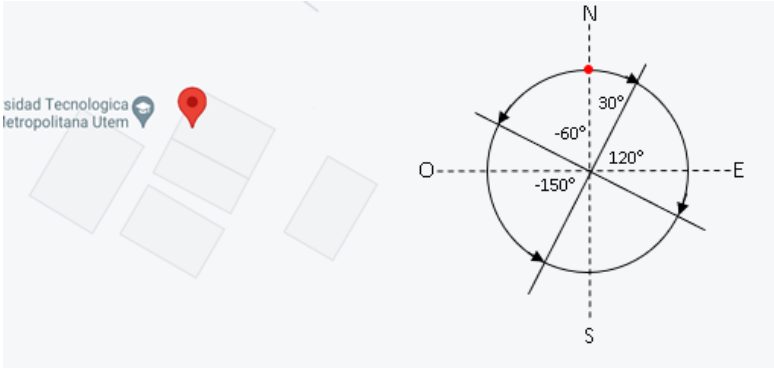


Figura 22: Invernadero fotovoltaico con las respectivas orientaciones de cada muro.

5.1.1. *Orientación Noreste (30°).*

Resultados de la generación fotovoltaica:

$$Total\ diario: 1\ kWh$$

$$Total\ anual: 364\ kWh$$

$$Factor\ de\ planta: 14\ \%$$

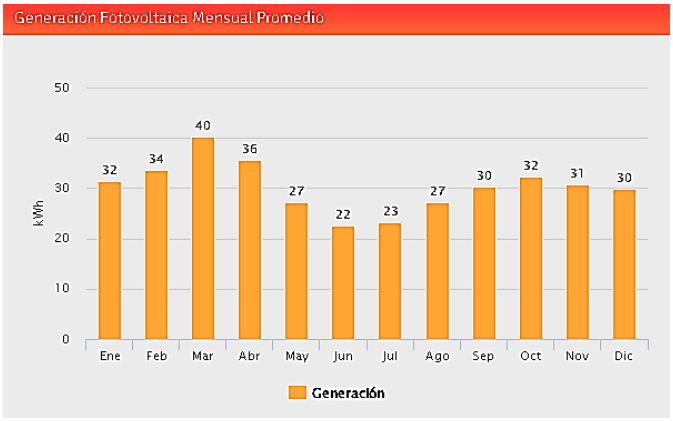


Figura 23: Generación fotovoltaica mensual promedio orientación noreste [19].

5.1.2. *Orientación sureste (120°).*

Resultados de la generación fotovoltaica:

$$Total\ diario: 0{,}79\ kWh$$

$$Total\ anual: 290\ kWh$$

$$Factor\ de\ planta: 11\ \%$$

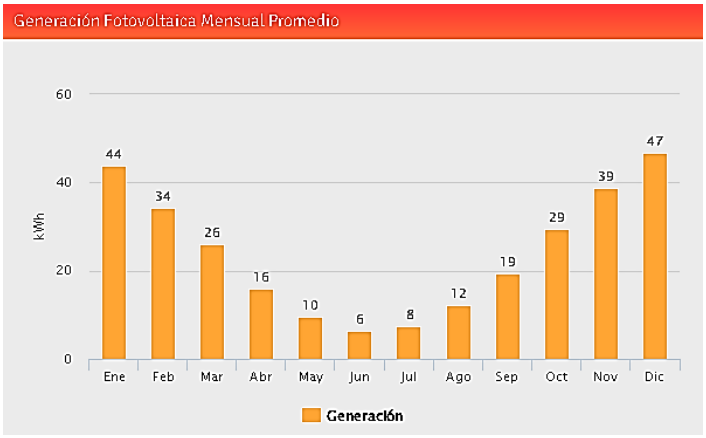


Figura 24: Generación fotovoltaica mensual promedio orientación sureste [19].

5.1.3. Orientación suroeste (-150°).

Resultados de la generación fotovoltaica:

$$Total\ diario: 0{,}6\ kWh$$
$$Total\ anual: 217\ kWh$$
$$Factor\ de\ planta: 8\ \%$$

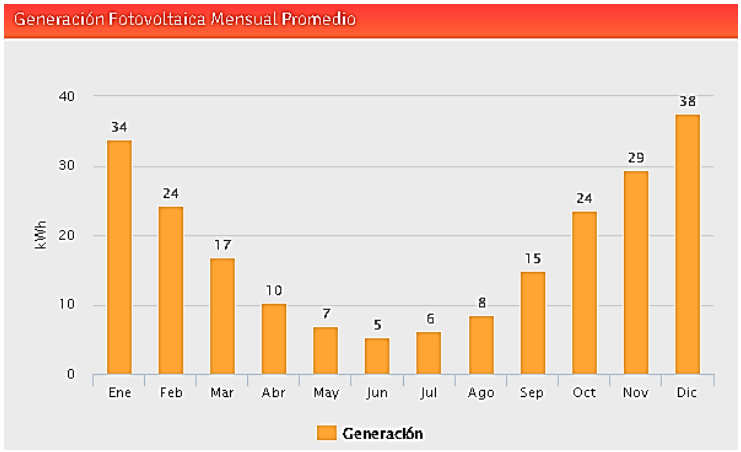


Figura 25: Generación fotovoltaica mensual promedio orientación suroeste [19].

5.1.4. Orientación noroeste (-60°).

Resultados de la generación fotovoltaica:

$$Total\ diario: 1{,}13\ kWh$$
$$Total\ anual: 413\ kWh$$
$$Factor\ de\ planta: 16\ \%$$

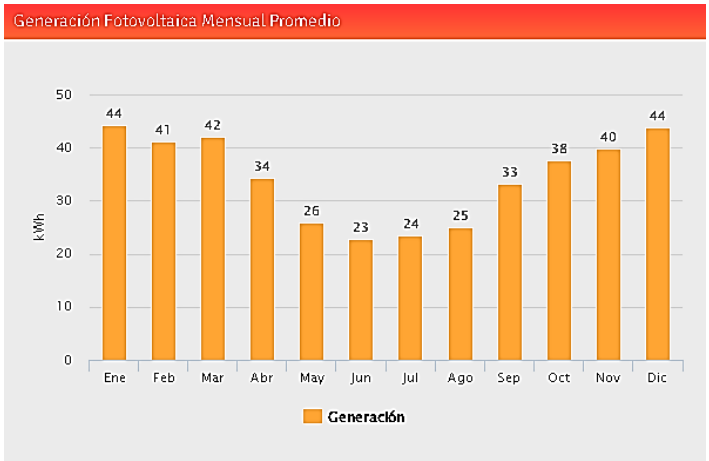


Figura 26: Generación fotovoltaica mensual promedio orientación noroeste [19].

En la Figura 23, Figura 24, Figura 25 y la Figura 26, se logra apreciar el comportamiento de un módulo fotovoltaico bifacial para distintas orientaciones correspondientes a los muros de un invernadero, destacando la generación fotovoltaica en las orientaciones noreste y noroeste en donde se presenta una generación más estable a lo largo del año y un mayor factor planta en comparación a las otras orientaciones simuladas.

5.2. Diseño del sistema de generación bifacial

De la sección anterior, se identifican las mejores orientaciones para la generación fotovoltaica con el módulo bifacial instalado en el invernadero del campus Colchagua de la Universidad de O'Higgins, siendo estas noreste y noroeste. En base a esta información y considerando la facilidad de acceso y de integración del invernadero sin comprometer la estructura de este, se escoge como ubicación para instalar el módulo bifacial el muro orientado hacia el noreste.

5.2.1. Muro fotovoltaico

Una vez estudiado donde se desean instalar los módulos fotovoltaicos, se realizó un diseño de integración utilizando el software AUTOCAD para el módulo fotovoltaico bifacial en el muro del invernadero, el cual se evidencia ampliado en la Figura 27 y completo en el Anexo 9.

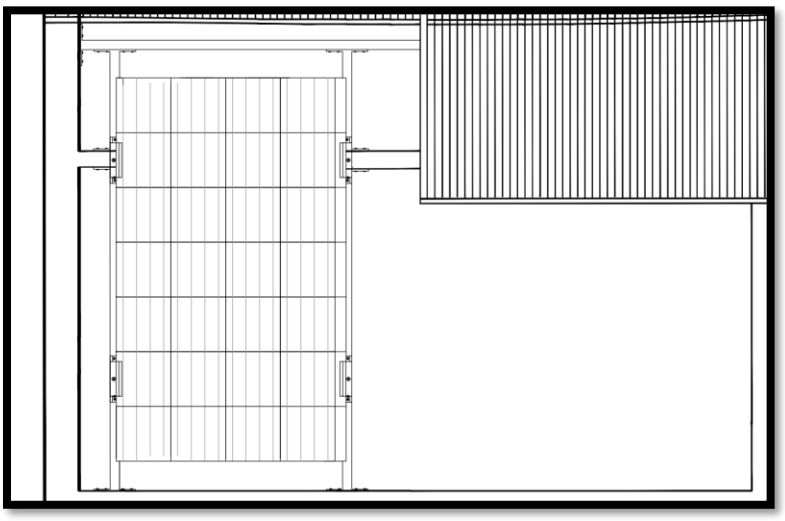


Figura 27: Diseño integración módulo fotovoltaico monofacial y bifacial.

5.2.2. Esquema de conexión

Se realizo un esquema de conexión, visible en la Figura 28, el cual se compone del micro inversor modelo M250-72-2LN-S2 del fabricante Enphase, el sistema de monitoreo Envoy modelo ENV-230-EU-M del fabricante Enphase, 2 interruptores automáticos C6A modelo EBS6BN del fabricante Lexo.

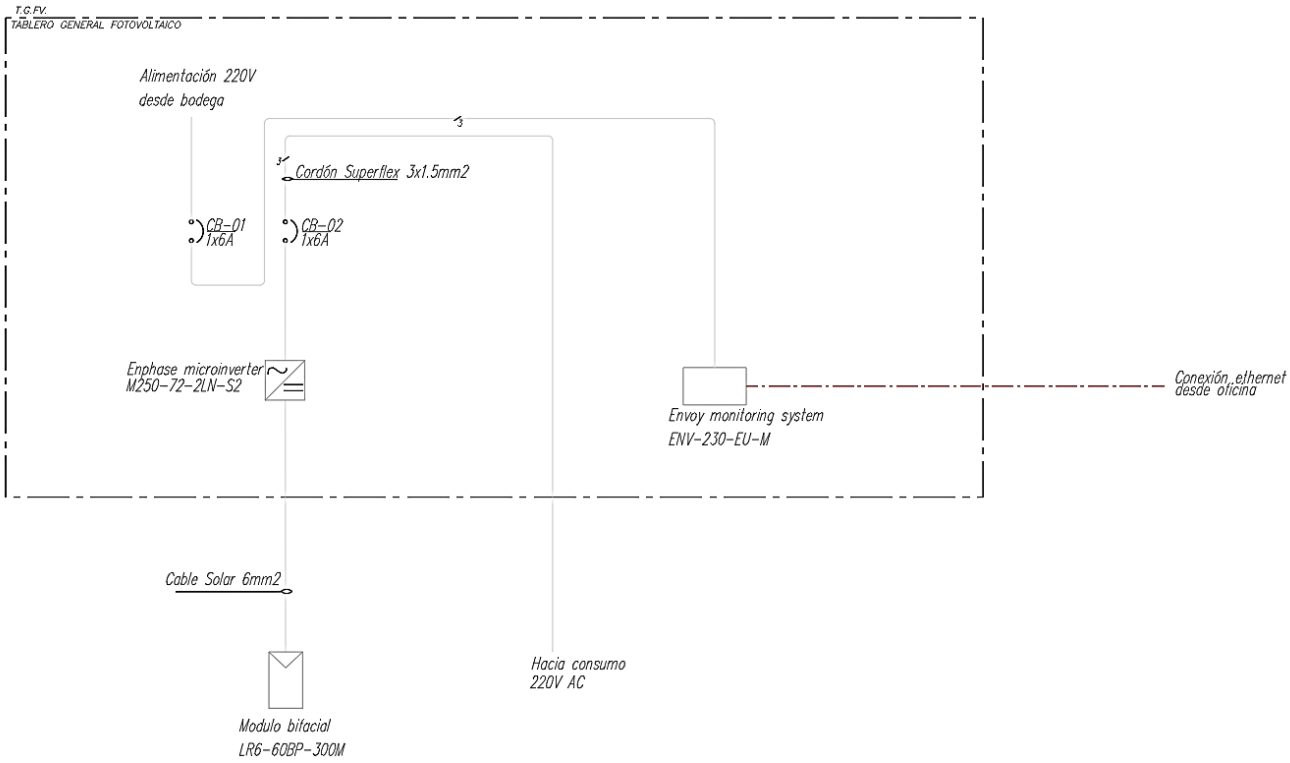


Figura 28: Esquema de conexión módulo fotovoltaico – sistema de monitoreo.

5.2.3. Presupuesto

El costo total de la instalación asciende a la suma total de $685.000, el detalle de esto se muestra en el Anexo 7 y el Anexo 8 del documento.

5.3. Instalación del sistema de generación

Las visitas a los invernaderos del Campus Colchagua de la Universidad de O'Higgins los días 9 y 17 de diciembre de 2021 tuvieron como objetivo la instalación del módulo fotovoltaico bifacial como muro del invernadero en el muro con orientación noreste y la instalación del tablero eléctrico asociado al monitoreo de la generación del módulo en cuestión, dando como resultado lo observado en la Figura 29 y la Figura 30.

(a) *(b)*

Figura 29: Módulo fotovoltaico bifacial integrado como muro al invernadero; (a) vista exterior y (b) vista interior.

Figura 30: Interior del tablero eléctrico

En la Figura 29, se evidencia la cara frontal del módulo fotovoltaico instalado como muro en el invernadero, la generación en esta cara se ve perjudicada debido a un cartel existente en el lugar, el cual genera sombra a ciertas horas del día. En la Figura 30, se evidencia la cara trasera del módulo fotovoltaico instalado como muro en el invernadero, la generación en esta cara se ve perjudicada considerablemente debido a un nylon presente en el lugar.

En la Figura 30 se ve el interior del tablero eléctrico asociado al sistema de monitoreo para la generación del módulo fotovoltaico, adicionalmente se puede observar un multitester funcionando como voltímetro midiendo el voltaje CC generado por el módulo instalado.

5.4. Resultados experimentales

Se tomaron datos cada 15 minutos tanto de voltaje en circuito abierto como de corriente en cortocircuito del módulo bifacial. Con estos datos se calculó la potencia eléctrica disponible en el módulo bifacial. La información anterior fue recopilada el día 27 de enero del 2022 y se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6: Mediciones corriente, voltaje y potencia del panel solar

Hora	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
11:00:00	6,32	37	233,84
11:15:00	6,02	37,1	223,342
11:30:00	5,8	37	214,6
11:45:00	5,72	37	211,64
12:00:00	5,53	36,9	204,057
12:15:00	5,24	37	193,88
12:30:00	4,9	37	181,3
12:45:00	4,64	36,9	171,216
13:00:00	4,39	37	162,43
13:15:00	3,63	36,9	133,947
13:30:00	1,77	36,6	64,782
13:45:00	1,51	36,4	54,964
14:00:00	1,56	36,1	56,316
14:15:00	1,56	36	56,16
14:30:00	1,52	35,8	54,416
14:45:00	1,48	35,8	52,984
15:00:00	1,42	35,9	50,978
15:15:00	1,32	35,9	47,388
15:30:00	1,14	35,9	40,926
15:45:00	1,03	35,9	36,977
16:00:00	0,95	35,9	34,105
16:15:00	0,89	35,8	31,862
16:30:00	0,85	35,8	30,43
16:45:00	0,83	35,8	29,714
17:00:00	0,8	35,7	28,56
17:15:00	0,78	35,6	27,768
17:30:00	0,77	35,6	27,412
17:45:00	0,77	35,6	27,412
18:00:00	0,76	35,6	27,056

Una vez obtenida la muestra de datos y tabulados, se realizó el gráfico correspondiente a la potencia disponible en el módulo bifacial, como se muestra en la Figura 31.

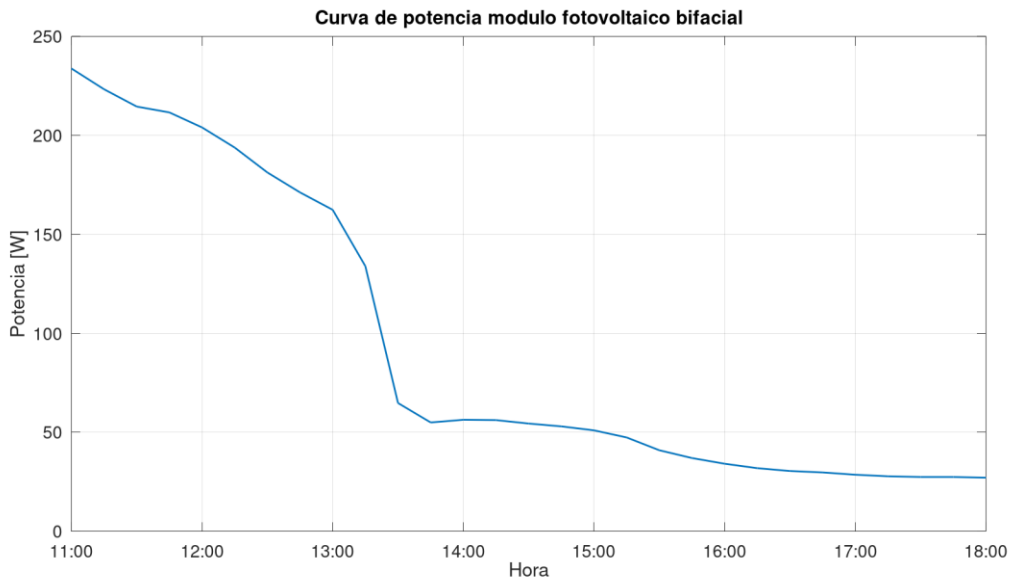


Figura 31: Curva de potencia módulo fotovoltaico bifacial.

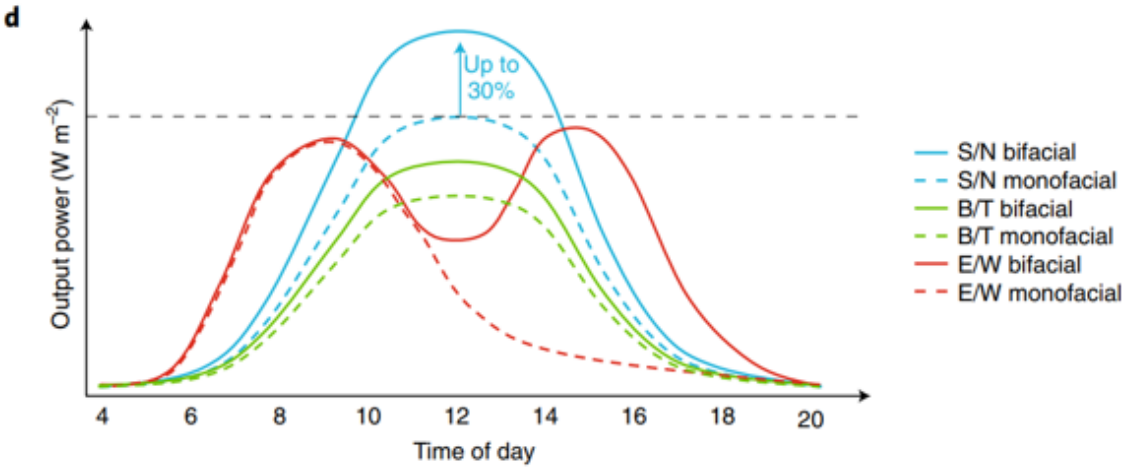


Figura 32: Detalle ampliado de la Figura 7.

La Figura 31 muestra la curva de potencia del módulo fotovoltaico bifacial a lo largo de 7 horas. Se puede apreciar que entre las 11:00 y las 13:00 la potencia disponible disminuye a una tasa estimada de 35.71 W/h. Luego entre las 13:00 y las 13:30 esta tasa de disminución se acelera, llegando a un valor de 195.3 W/h. Posteriormente, la tasa de disminución se desacelera entre las 13:30 y las 13:45, llegando a un valor de 39.27 W/h. Si recordamos el grafico de generación ideal de un panel bifacial (ver Figura 32), es en este punto donde debiéramos esperar

la aparición del segundo peak de generación, muy característico de esta tecnología. No obstante, de los datos recopilados podemos ver que estamos en presencia de un segundo peak que presenta una atenuación importante, como se puede apreciar en la Figura 32 entre las 13:45 y las 15:30. El efecto antes mencionado, deja en evidencia que el comportamiento de nuestro sistema bifacial se aleja del comportamiento ideal. Esto es esperable al tratarse de una instalación real y su explicación puede deberse, principalmente, a distintos factores que se explican a continuación.

- **Estructura del invernadero**: Cabe destacar que la gráfica teórica con la que se realiza la comparación corresponde a una simulación en campo abierto, en cambio el sistema de generación bifacial instalado es en un muro del invernadero. Perjudicando la radiación captada por la cara trasera del módulo debido a los distintos muros del invernadero, los cuales poseen un nylon semi transparente y el techo de este, conformado por paneles fotovoltaicos monofaciales semitransparentes.

- **Azimut no ideal**: Cabe recordar que la generación ideal para los módulos fotovoltaicos bifaciales instalados de manera vertical se obtiene con un azimut de 90 o -90° (orientación este u oeste). El módulo bifacial con el que se trabajó fue instalado sobre una de las paredes del invernadero existente, obteniéndose un azimut de 30°. Con este valor de azimut no se aprovecha al máximo el recorrido del sol a lo largo del día para la captación solar por ambas caras del módulo.

- **Albedo**: Otro potencial factor es el albedo existente en el lugar, el cual se ve perjudicado, ya que al interior del invernadero existe una alta presencia de vegetación.

6. Conclusión

6.1. Resumen

En el presente trabajo se realizó una evaluación de la tecnología fotovoltaica bifacial aplicada en un invernadero, estudiando las tecnologías fotovoltaicas monofacial y bifacial a través de la revisión de diversos artículos académicos sobre sistemas agrovoltaicos y plantas bifaciales actuales. Adicionalmente, se realizó la simulación de ambas tecnologías y una comparación teórica. Finalmente se presentan los resultados de la evaluación practica de un modulo bifacial instalado en un invernadero fotovoltaico.

6.2. Conclusiones

Se estudió un caso de referencia mediante un análisis de un sistema de generación monofacial instalado en el techo de un invernado a través de distintas simulaciones. Esto permitió concluir que este tipo de tecnología puede no ser suficiente para aportar de manera eficiente el auto consumo por los invernaderos, naciendo la idea de integrar una nueva tecnología complementaria a la instalación existente para suplir la demanda faltante.

Se recomendó el uso de la tecnología bifacial instalada de manera vertical en los muros del invernadero para aprovechar los beneficios que supone esta tecnología al instalarse de esta manera: captar la radiación proveniente del sol por ambas caras del módulo fotovoltaico y así tener 2 peak de generación, uno por la mañana y otro por la tarde.

Se realizo la instalación de un sistema de generación fotovoltaica bifacial en uno de los muros del invernadero ubicado en el campus Colchagua de la Universidad de O'Higgins el cual permitiera realizar mediciones en terreno de variables de voltaje y corriente del módulo fotovoltaico bifacial instalado. Con esto realizar un posterior análisis comparativo entre la teoría y la práctica. Se evidencia que el sistema instalado se alejó del comportamiento ideal debido a 3 factores principales: la estructura del invernadero, el azimut no ideal y el albedo del lugar.

Es importante destacar que el trabajo actual se basa en un solo set de datos tomados en terrenos durante 7 horas de operación, por lo tanto, este estudio sirve para una primera caracterización del comportamiento de esta tecnología bifacial como complemento a la tecnología fotovoltaica existente en el techo del invernadero, pero no para concluir sobre el real aporte energético para el autoconsumo del invernadero. Para esto último se requiere una evaluación más completa de la integración de esta tecnología y un conjunto de pruebas en terreno más extenso que permitan un análisis de generación más profundo sobre un periodo de tiempo más prolongado.

6.3. Trabajo futuro

Es importante mencionar que las mediciones fueron realizadas a lo largo de 7 horas de operación, por esto se consideran distintos puntos para un trabajo futuro que permitan evaluar de una manera más a profundidad el trabajo presentado:

- Para obtener una mejor caracterización del comportamiento generativo del módulo fotovoltaico mediante simulaciones, se propone la evaluación del albedo, mediante el estudio del comportamiento reflexivo de distintos suelos representativos existentes en el lugar.

- Para obtener mayor información y realizar un estudio más concluyente con respecto al real aporte energético de la tecnología bifacial aplicada a invernaderos, se propone utilizar el sistema de monitoreo especificado en el esquema de la Figura 28, el cual durante el desarrollo de este trabajo no se pudo implementar por una falla en el inversor. Este sistema permitiría registrar resultados de manera remota, sistemática y por un tiempo más prolongado.

Referencias

[1] J. Xue, «Photovoltaic agriculture – New opportunity for photovoltaic applications in China», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 1–9, jun. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.098.

[2] G. M. Tina, F. B. Scavo, L. Merlo, y F. Bizzarri, «Comparative analysis of monofacial and bifacial photovoltaic modules for floating power plants», *Applied Energy*, vol. 281, p. 116084, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116084.

[3] W. Brokering, R. Palma, B. Blanco, y D. Espín, *Atrapando el sol en los sistemas electricos de potencia*, vol. 1. Santiago de Chile, 2018.

[4] «Dobrzański et al. – 2012 – Monocrystalline silicon solar cells applied in pho.pdf». Accedido: 13 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol53_1/5311.pdf

[5] R. Serrano, «TIPOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS», *Tritec Intervento*, 18 de agosto de 2017. https://tritec-intervento.cl/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/ (accedido 27 de febrero de 2022).

[6] J. Silva, «Repositorio Bibliotecas UdeC: Operación óptima de una planta fotovoltaica basada en paneles bifaciales.» Accedido: 27 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/9194

[7] AméricaEconomía, «Primera planta fotovoltaica con paneles bifaciales inicia operaciones en Chile». https://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/primera-planta-fotovoltaica-con-paneles-bifaciales-inicia-operaciones-en-chile (accedido 27 de febrero de 2022).

[8] «SOLAR UVB-ALBEDO OF VARIOUS SURFACES – Blumthaler – 1988 – Photochemistry and Photobiology – Wiley Online Library». https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1751-1097.1988.tb02790.x (accedido 27 de febrero de 2022).

[9] T. Markvart, A. McEvoy, y others, *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications*. Elsevier, 2003.

[10] R. Satpathy, «Additional Energy yield using Bifacial Solar PV Modules & dependency on Albedo», p. 12.

[11] R. Kopecek y J. Libal, «Towards large-scale deployment of bifacial photovoltaics», *Nature Energy*, vol. 3, n.º 6, pp. 443–446, jun. 2018, doi: 10.1038/s41560-018-0178-0.

[12] Reporte Sostenible, «Paneles fotovoltaicos semitransparentes instalados en un invernadero permiten cosechar sus primeros frutos». http://reportesostenible.cl/Paneles-fotovoltaicos-semitransparentes-instalados-en-un-invernadero-permiten-cosechar-sus-primeros-frutos/?fbclid=IwAR1XULmE3XDv-MHOds9JYxEIOWcapI2_dYojKzqWoS6L70jUnPDTNHvQyzI (accedido 27 de febrero de 2022).

[13] Fraunhofer Chile, «AgroPV». https://www.fraunhofer.cl/es/Prensa/biblioteca-virtual/galeria-de-fotos/agropv.html (accedido 27 de febrero de 2022).

[14] SMA Solar Technology AG, «SUNNY DESIGN». https://www.sunnydesignweb.com/sdweb/#/ (accedido 28 de febrero de 2022).

[15]«CÓMO CALCULAR UN AIRE ACONDICIONADO Cálculo De BTU». https://aireacondicionadototal.com/como-calcular-un-aire-acondicionado/ (accedido 28 de febrero de 2022).
[16]NOVAGRIC, «Clima de un Invernadero. ¿Cómo conseguir la Temperatura Ideal?» https://www.novagric.com/es/blog/articulos/clima-invernadero-como-conseguir-temperatura-ideal#:~:text=La%20temperatura%20ideal%20para%20la,malla%20de%20sombreo%20por%20fuera. (accedido 28 de febrero de 2022).
[17]«Global Solar Atlas». https://globalsolaratlas.info/map (accedido 7 de marzo de 2022).
[18]nrc.gov., «Capacity factor (net)», *NRC Web*. https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/capacity-factor-net.html (accedido 28 de febrero de 2022).
[19]«Explorador Solar». https://solar.minenergia.cl/inicio (accedido 7 de marzo de 2022).
[20]A. Tartaglia y others, «Tecnologías fotovoltaicas bifaciales: ¿vuelven para quedarse?», 2019.

YGE 60 CELL SERIES 2

ELECTRICAL PERFORMANCE

Electrical parameters at Standard Test Conditions (STC)								
Module type			YLxxxP-29b (xxx=P_{max})					
Power output	P_{max}	W	275	270	265	260	255	250
Power output tolerances	ΔP_{max}	W	0 / + 5					
Module efficiency	η_m	%	16.8	16.5	16.2	15.9	15.6	15.3
Voltage at P_{max}	V_{mpp}	V	31.0	30.7	30.5	30.3	30.0	29.8
Current at P_{max}	I_{mpp}	A	8.90	8.80	8.70	8.59	8.49	8.39
Open-circuit voltage	V_{oc}	V	37.9	37.9	37.8	37.7	37.7	37.6
Short-circuit current	I_{sc}	A	9.35	9.27	9.18	9.09	9.01	8.92

STC: 1000W/m² irradiance, 25°C module temperature, AM1.5g spectrum according to EN 60904-3.
Average relative efficiency reduction of 3.3% at 200W/m² according to EN 60904-1.

Electrical parameters at Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)								
Power output	P_{max}	W	200.6	196.9	193.3	189.7	186.0	182.4
Voltage at P_{max}	V_{mpp}	V	28.2	28.0	27.8	27.6	27.4	27.2
Current at P_{max}	I_{mpp}	A	7.12	7.04	6.96	6.87	6.79	6.71
Open-circuit voltage	V_{oc}	V	35.0	35.0	34.9	34.8	34.8	34.7
Short-circuit current	I_{sc}	A	7.56	7.49	7.42	7.35	7.28	7.21

NOCT: open-circuit module operation temperature at 800W/m² irradiance, 20°C ambient temperature, 1m/s wind speed.

THERMAL CHARACTERISTICS

Nominal operating cell temperature	NOCT	°C	46 +/- 2
Temperature coefficient of P_{max}	γ	%/°C	-0.42
Temperature coefficient of V_{oc}	β_{Voc}	%/°C	-0.32
Temperature coefficient of I_{sc}	α_{Isc}	%/°C	0.05

OPERATING CONDITIONS

Max. system voltage	1000V_{DC}
Max. series fuse rating	15A
Limiting reverse current	15A
Operating temperature range	-40°C to 85°C
Max. static load, front (e.g., snow)	5400Pa
Max. static load, back (e.g., wind)	2400Pa
Max. hailstone impact (diameter / velocity)	25mm / 23m/s
Moudle fire performance	Type1

CONSTRUCTION MATERIALS

Front cover (material / thickness)	low-iron tempered glass / 3.2mm
Cell (quantity / material / dimensions / number of busbars)	60 / multicrystalline silicon / 156.75mm x 156.75mm (+/-0.25) / 4 or 5
Frame (material)	anodized aluminum alloy
Junction box (protection degree)	≥ IP67
Cable (length / cross-sectional area)	1000mm / 4mm²
Plug connector (type / protection degree)	MC4 / IP68 or YT08-1S / IP67 or Amphenol H4 / IP68 or Forsol SIKE4 / IP68 or Renhe RH05-6 / IP67

• Due to continuous innovation, research and product improvement, the specifications in this product information sheet are subject to change without prior notice. The specifications may deviate slightly and are not guaranteed.
• The data do not refer to a single module and they are not part of the offer, they only serve for comparison to different module types.

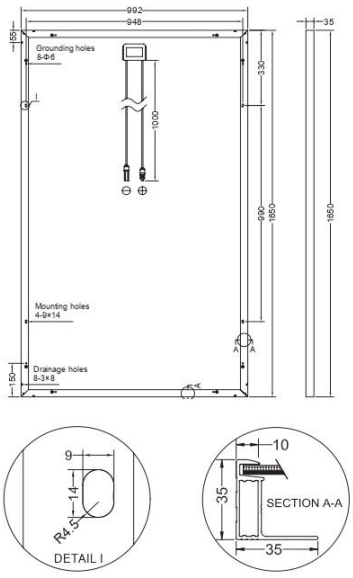
GENERAL CHARACTERISTICS

Dimensions (L / W / H)	1650mm / 992mm / 35mm
Weight	18.5kg

PACKAGING SPECIFICATIONS

Number of modules per pallet	30
Number of pallets per 40' container	28
Packaging box dimensions (L / W / H)	1700mm / 1135mm / 1165mm
Box weight	588kg

Unit: mm



Warning: Read the Installation and User Manual in its entirety before handling, installing, and operating Yingli Solar modules.

Yingli Partners:

Yingli Green Energy Americas
info@yingliamericas.com

YINGLISOLAR.COM | NYSE:YGE

© Yingli Green Energy Holding Co., Ltd.

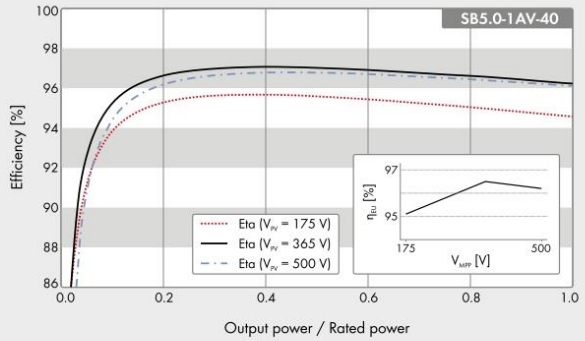
DS_YGE60CELL SERIES 2-29b_35mm_US_EN_20170821_V04

YINGLI SOLAR
Power Your Life

Yingli, Yingli Solar and the Yingli Logo are trademarks/registered trademarks of Yingli Energy (China) Company Ltd. Cosp/its affiliated companies in the U.S. and elsewhere. All rights reserved.
The specifications in this datasheet are not guaranteed and are subject to change without prior notice.

Anexo 1: Hoja de datos panel solar YL270P-29b

Efficiency curve



Technical data	Sunny Boy 3.0	Sunny Boy 3.6	Sunny Boy 4.0	Sunny Boy 5.0
Input (DC)				
Max. DC power (at cos φ =1)	3200 W	3880 W	4200 W	5250 W[1]
Max. input voltage	600 V			
MPP voltage range	110 V to 500 V	130 V to 500 V	140 V to 500 V	175 V to 500 V
Rated input voltage	365 V			
Min. input voltage / initial input voltage	100 V / 125 V			
Max. input current input A / input B	15 A / 15 A			
Max. input current per string input A / input B	15 A / 15 A			
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input	2 / A:2; B:2			
Output (AC)				
Rated power (at 230 V, 50 Hz)	3000 W	3680 W	4000 W	5000 W[2]
Max. apparent power AC	3000 VA	3680 VA	4000 VA	5000 VA[2]
Nominal AC voltage / range	220 V, 230 V, 240 V / 180 V to 280 V			
AC power frequency / range	50 Hz, 60 Hz / −5 Hz to +5 Hz			
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V			
Max. output current	16 A	16 A	22 A[3]	22 A[3]
Power factor at rated power	1			
Adjustable displacement power factor	0.8 overexcited to 0.8 underexcited			
Feed-in phases / connection phases	1 / 1			
Efficiency				
Max. efficiency / European Efficiency	97.0% / 96.4%	97.0% / 96.5%	97.0% / 96.5%	97.0% / 96.5%
Protective devices				
Input-side disconnection point	●			
Ground fault monitoring / grid monitoring	● / ●			
DC reverse polarity protection / AC short circuit current capability / galvanically isolated	● / ● / –			
All-pole-sensitive residual-current monitoring unit	●			
Protection class (as per IEC 62103) / overvoltage category (according to IEC 60664-1)	I / III			
General data				
Dimensions (W / H / D)	435 mm / 470 mm / 176 mm (17.1 inches / 18.5 inches / 6.9 inches)			
Weight	16 kg (35.3 lb)			
Operating temperature range	–25°C to +60°C (–13°F to +140°F)			
Noise emission, typical	25 dB(A)			
Self-consumption (at night)	1.0 W			
Topology	Transformerless			
Cooling method	Convection			
Degree of protection (as per IEC 60529)	IP65			
Climatic category (as per IEC 60721-3-4)	4K4H			
Max. permissible value for relative humidity (non-condensing)	100%			
Equipment				
DC connection / AC connection	SUNCLIX / AC connector			
Display via smartphone, tablet, laptop	●			
Interfaces: WLAN, Speedwire / Webconnect	● / ●			
Warranty: 5 / 10 / 15 years	● / ○ / ○			
Certificates and approvals (more available upon request)	AS 4777, C10/11, CE, CEI 0-21, EN 50438, G59/3, G83/2, DIN EN 62109 / IEC 62109, NEN-EN50438, RD1699, SI 4777, UTE C15-712, VDE-AR-N 4105, VDE0126-1-1, VFR 2014			
Certificates and approvals (planned)	IEC 61727, NRS 097-2-1			
Country availability of SMA Smart Connected	AU, AT, BE, CH, DE, ES, FR, IT, LU, NL, UK			
● Standard features ○ Optional features – Not available Data at nominal conditions Status: February 2017 1) 4825 W according to VDE-AR-N 4105 2) 4600 W / 4600 VA according to VDE-AR-N 4105 3) AS 4777: 21.7 A				
Type designation	SB3.0-1AV-40	SB3.6-1AV-40	SB4.0-1AV-40	SB5.0-1AV-40

Anexo 2: Hoja de datos inversor SB5.0-1AV-40

Equipo
Aire Acondicionado
Split Muro Inverter

ESPECIFICACIONES		UNIDADES	KSM - 09BC1	KSM - 12BC1	KSM - 18BC1	KSM - 24BC1
CAPACIDAD MODELO NOMINAL		Btu/h	9.000	12.000	18.000	24.000
FRÍO	Capacidad	kW	2,638	3,517	5.275	6,741
	Potencia Absorbida	W	750	1.096	1.696	2.100
	Consumo Corriente	A	3,5	4,8	7,5	9,5
CALOR	Capacidad	kW	2,87	3,517	5,123	6,617
	Potencia Absorbida	W	755	1.096	1.464	1.891
	Consumo Corriente	A	3,5	4,8	6,5	8,5
PÁRÁMETROS ELÉCTRICOS	Tensión	V/Ph/Hz	200~240/1/50	200~240/1/50	220~240/1/50	220~240/1/50
	Corriente Máxima	A	6,24	9,5	12	14
	EER (Frío)	W/W	3,21	3,20	3,20	3,20
	COP (Calor)	W/W	3,41	3,40	3,61	3,61
COM PRE SOR	Modelo	Tipo	Rotativo	Rotativo	Rotativo	Rotativo
	Marca	-	GMCC	GMCC	GMCC	GMCC
	Potencia Entrada	W	748	748	1.035	1.970
UNIDAD INTERIOR	Caudal (Turbo - Hi/Mi/Lo)	m^3/h	420/310/240	600/475/380	801/608/502	1.112/887/703
	Nivel de Ruido (Turbo)	dB(A)	37/33/23/22	40,7/-/26,5	47,2/-/32	51,9/-/34,7
	Peso Neto/Bruto	kg	7,4/9,6	8,8/11,2	11,6/14,8	13,8/17,3
	Dimensiones	mm	722 x 187 x 290	802 x 189 x 297	965 x 215 x 319	1.080 x 226 x 335
	Dimensiones con Embalaje	mm	790 x 270 x 370	875 x 285 x 375	1.045 x 305 x 405	1.155 x 415 x 315
UNIDAD EXTERIOR	Refrigerante	-	R410A	R410A	R410A	R410A
	Cantidad de Refrigerante	g	800	760	1.400	1,650
	Nivel de Ruido	dB(A)	≤55	≤53,1	≤55,3	≤60,5
	Peso Neto/Bruto	kg	26,6/29	26/28,4	35,5/38,3	45,6/48,8
	Dimensiones	mm	770 x 300 x 555	770 x 300 x 555	800 x 333 x 554	845 x 363 x 702
	Dimensiones con Embalaje	mm	900 x 345 x 585	900 x 345 x 585	920 x 390 x 615	965 x 395 x 765
CONEXIÓN	Presión Descarga/Succión	Mpa	4,2/1,5	4,2/1,5	4,2/1,5	4,2/1,5
	Ø Tubería de línea líquida	mm	6,35 ~ 1/4"	6,35 ~ 1/4"	6,35 ~ 1/4"	9,52 ~ 3/8"
	Ø Tubería de línea gas	mm	9,52 ~ 3/8"	12,7 ~ 1/2"	12,7 ~ 1/2"	15,9 ~ 5/8"
	Altura Máx. entre UE-UI	m	10	10	20	25
	Longitud Máxima	m	25	25	30	50
OPERACIÓN	Tipo Control	-	Control Remoto	Control Remoto	Control Remoto	Control Remoto
	T° Interior (Frío/Calor)	°C	17~32 / 0~30	17~32 / 0~30	17~32 / 0~30	17~32 / 0~30
	T° Exterior (Frío/Calor)	°C	0~50 / -15~30	0~50 / -15~30	0~50 / -15~30	0~50 / -15~30

Anexo 3: Hoja de datos Aire acondicionado Khone KSM-18BC1

MONO 370W/375W/380W/385W

ulica solar
LEADING IN TECHNOLOGY

ELECTRICAL PERFORMANCE

Electrical Parameters Standard Test Conditions

Module Type			UL-370M-72	UL-375M-72	UL-380M-72	UL-385M-72
Power Output	Pmax	W	370	375	380	385
Power Tolerance	△Pmax	W		0/+5W		
Module Efficiency	ηm	%	19.07	19.33	19.58	19.84
Voltage at Pmax	Vm	V	39.4	39.5	39.6	39.7
Current at Pmax	Im	A	9.39	9.49	9.60	9.70
Open-Circuit Voltage	Voc	V	48.2	48.4	48.5	48.6
Short-Circuit Current	Isc	A	9.88	9.96	10.07	10.17

STC: 1000w/m² irradiance, 25°C module temperature, AM1.

THERMAL CHARACTERISTICS

Nominal Operating Cell Temperature	NOCT	°C	45±2
Temperature Coefficient of Pmax	γ	%/°C	-0.390
Temperature Coefficient of Voc	β_{voc}	%/°C	-0.290
Temperature Coefficient of Isc	α_{isc}	%/°C	+0.049

OPERATING CONDITIONS

Max.System Voltage	1000V/1500V
Max.Series Fuse Rating	15A
Operating Temperature Range	-40°C～85°C
Max static snow load	5400Pa
Max static wind load	3800Pa
Application Class	A

CONSTRUCTION MATERIALS

Front Cover(material/type/thickness)	low-iron tempered glass/3.2mm
Cell(quantity/material/type/dimension)	72/monocrystalline/156.75x156.75mm
Encapsulant(material)	ethylene vinyl acetate(EVA)
Frame(material/anodization color)	anodized aluminum alloy/silver or black
Junction Box(protection degree)	IP67
Cable(length/cross-sectional area)	1100mm/4mm²
Plug Connector	MC4 compatible

GENERAL CHARACTERISTICS

Dimension(L/W/H)	1956/992/40mm
Weight	21.5kg

PACKING CONFIGURATION

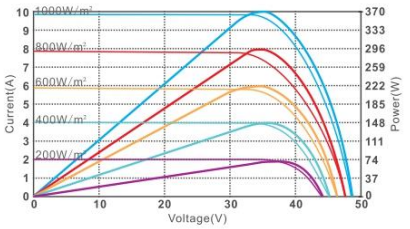
Pallet Size(L/W/H)	1990/1120/2460mm
Pallet Weight	1357kg
Pieces per Pallet	56pcs
Pieces per Container	672pcs

INTERNATIONAL CERTIFICATES

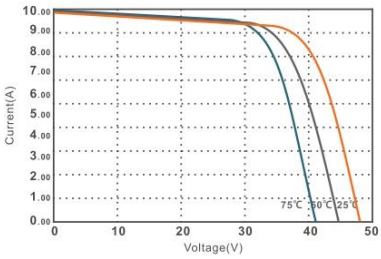
- TÜV SÜD,TÜV NORD,UL,CE,JET,CEC MCS,CQC,INMETRO,NRE,KS
- ISO9001:2015
- ISO14001:2015
- BS OHSAS 18001:2007

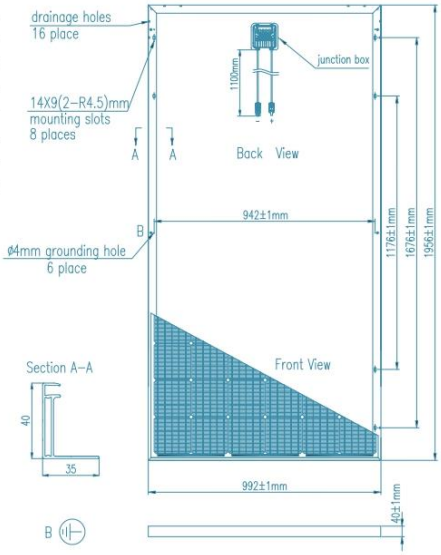
I-V CURVE

I-V characteristics at different irradiations



I-V characteristics at different temperature





Please read the instruction manual in this entirety before handing, installing,and operating Ulica Solar modules.

Due to continuous Innocation, research and improvement , the specification is subject to change without prior notice.

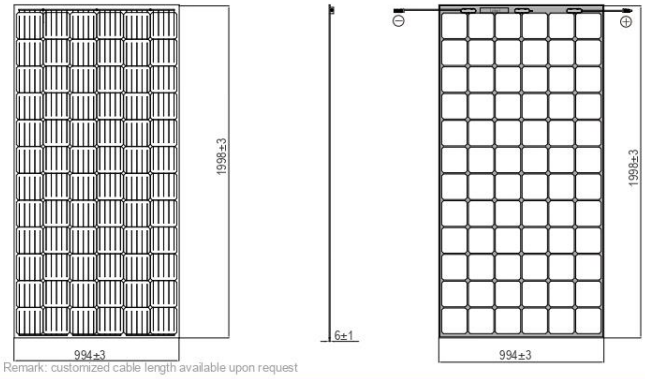
www.ulicasolar.com

Anexo 4: Hoja de datos módulo solar monofacial UL-380M-72

JA SOLAR

JAM72D09 370-390/BP Series

MECHANICAL DIAGRAMS



Remark: customized cable length available upon request

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	28.5kg±3%
Dimensions	1998±3mm×994±3mm×6±1mm (1998mm×994mm×25mm with junction box)
Cable Cross Section Size	4mm²
No. of cells	72(6x12)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	QC 4.10-35
Cable Length (Including Connector)	Portrait:300mm(+)/400mm(-); Landscape:1200mm(+)/1200mm(-)
Packaging Configuration	28 Per Pallet

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM72D09 -370/BP	JAM72D09 -375/BP	JAM72D09 -380/BP	JAM72D09 -385/BP	JAM72D09 -390/BP
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	370	375	380	385	390
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	48.20	48.51	48.81	49.11	49.42
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	39.41	39.73	40.02	40.33	40.63
Short Circuit Current(Isc) [A]	9.91	9.97	10.03	10.09	10.14
Maximum Power Current(Imp) [A]	9.39	9.44	9.50	9.55	9.60
Module Efficiency [%]	18.6	18.9	19.1	19.4	19.6
Power Tolerance	0~+5W				
Temperature Coefficient of Isc(α_Isc)	+0.060%/°C				
Temperature Coefficient of Voc(β_Voc)	-0.300%/°C				
Temperature Coefficient of Pmax(γ_Pmp)	-0.370%/°C				
STC	Irradiance 1000W/m², cell temperature 25°C, AM1.5G				

Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer.They only serve for comparison among different module types.
*Bifaciality=Pmax,rear/Rated Pmax,front

ELECTRICAL CHARACTERISTICS WITH DIFFERENT REAR SIDE POWER GAIN(REFERENCE TO 385W FRONT)

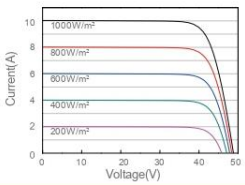
Backside Power Gain	5%	10%	15%	20%	25%
Rated Max Power(Pmax) [W]	404	424	443	462	481
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	49.11	49.11	49.11	49.21	49.21
Max Power Voltage(Vmp) [V]	40.33	40.33	40.33	40.43	40.43
Short Circuit Current(Isc) [A]	10.59	11.10	11.60	12.11	12.61
Max Power Current(Imp) [A]	10.02	10.51	10.98	11.43	11.90

OPERATING CONDITIONS

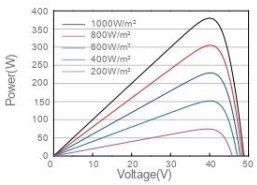
Maximum System Voltage	1500V DC(IEC)
Operating Temperature	-40°C~+85°C
Maximum Series Fuse	20A
Maximum Static Load,Front Maximum Static Load,Back	2400Pa 2400Pa
NOCT	45±2°C
Bifaciality*	70%±5%

CHARACTERISTICS

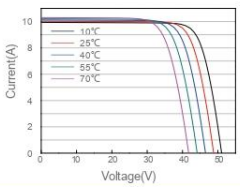
Current-Voltage Curve JAM72D09-380/BP



Power-Voltage Curve JAM72D09-380/BP



Current-Voltage Curve JAM72D09-380/BP

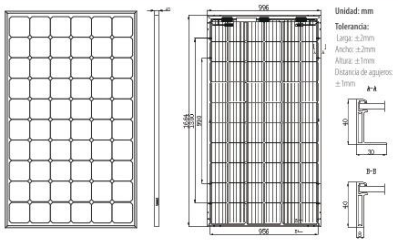


Premium Cells, Premium Modules Version No. : Global_EN_20190703A

Anexo 5: Hoja de datos módulo solar bifacial JAM72D09-380/BP

LR6-60BP **290~310M**

Dimensión(mm)



Parámetros mecánicos

Orientación Celular: 60 (6×10)

Caja de conexiones: IP67, tres diodos

Cable de salida: 4mm², 300mm (longitud) la longitud se puede personalizar

Peso: 22.5kg

Dimensión: 1664×996×40mm

Packaging: 26 Módulos por palet

Parámetros de operación

Temperatura opcional: -40 ℃ ~ +85 ℃

Tolerancia de salida de potencia: 0 ~ +5 W

Tolerancia de Voc e Isc: ± 3%

Voltaje máximo del sistema: DC1500V (IEC)

Corriente máxima de fusibles en serie: 20A

Temperatura nominal para célula de operación: 45±2 ℃

Clase de aplicación: Clase II

Bifacialidad: ≥75%

Características electricas

Incertidumbre de Pmax: ±3%

Tipo de modelo	LR6-60BP-290M		LR6-60BP-295M		LR6-60BP-300M		LR6-60BP-305M		LR6-60BP-310M	
Condición de prueba	Front	Back	Front	Back	Front	Back	Front	Back	Front	Back
Potencia máxima (Pmax / W)	290	218	295	222	300	225	305	229	310	233
Voltaje de circuito abierto (Voc / V)	39.7	39.5	39.9	39.7	40.0	39.8	40.1	39.9	40.2	40.0
Corriente de cortocircuito (Isc / A)	9.59	7.24	9.68	7.32	9.79	7.38	9.92	7.49	10.05	7.59
Voltaje a la potencia máxima (Vmp/V)	32.2	32.6	32.4	32.8	32.5	32.9	32.7	33.1	32.9	33.2
Corriente a potencia máxima (Imp/A)	9.00	6.69	9.11	6.78	9.23	6.84	9.33	6.92	9.44	7.01
Eficiencia del módulo (%)	17.5	13.2	17.8	13.4	18.1	13.6	18.4	13.8	18.7	14.1

CPE (Condiciones de Prueba Estándar): Irradiancia 1000W/m², Temperatura de célula 25 ℃, Espectros en AM1.5

Características eléctricas con varias ganancias de potencia en el lado trasero (referencia a 300W en el lado delantero)

Pmax /W	Voc/V	Isc /A	Vmp/V	Imp /A	Pmax gain
315	40.0	10.28	32.5	9.69	5%
330	40.0	10.77	32.5	10.15	10%
345	40.1	11.26	32.4	10.61	15%
360	40.1	11.75	32.4	11.07	20%
375	40.1	12.24	32.4	11.53	25%

Clasificaciones de temperatura (CPE)

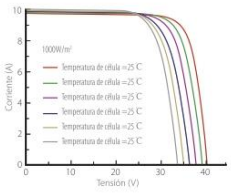
Coeficiente de temperatura en Isc	+0.060%/ ℃
Coeficiente de temperatura en Voc	-0.300%/ ℃
Coeficiente de temperatura en Pmax	-0.380%/ ℃

Carga mecánica

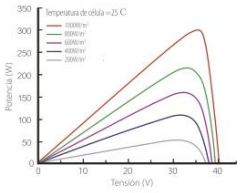
Carga estática máxima en el lado delantero	5400Pa
Carga estática máxima en el lado trasero	2400Pa
Prueba con piedras de granizo	Granizo de 25mm a la velocidad de 23m/s

Curva de I-V

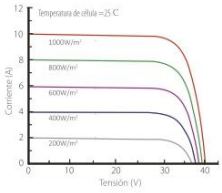
Curva de Corriente-Voltaje (LR6-60BP-300M)



Curva de Potencia-Voltaje (LR6-60BP-300M)



Curva de Corriente-Voltaje (LR6-60BP-300M)



LONGi Solar

Sala 201, Edificio 8, Sandhill Plaza, Calle 2290, Camino Zuchongzhi, Distrito de Pudong, Shanghai, 201203
Tel: + 86-21-61047332 Fax: +86-21-61047377 E-mail: module@longi-silicon.com
Facebook: www.facebook.com/LONGi Solar

Nota: Debido a la innovación técnica y la reforma de I+D continua, los datos técnicos mencionados anteriormente pueden modificarse en consecuencia. LONGi Solar tiene el derecho exclusivo de realizar dichas modificaciones en cualquier momento sin previo aviso; La parte demandante debería solicitar la última hoja de datos para la necesidad de contratos y contenidos vinculantes en documentación legal firmada obligatoriamente por ambas partes.

20180520

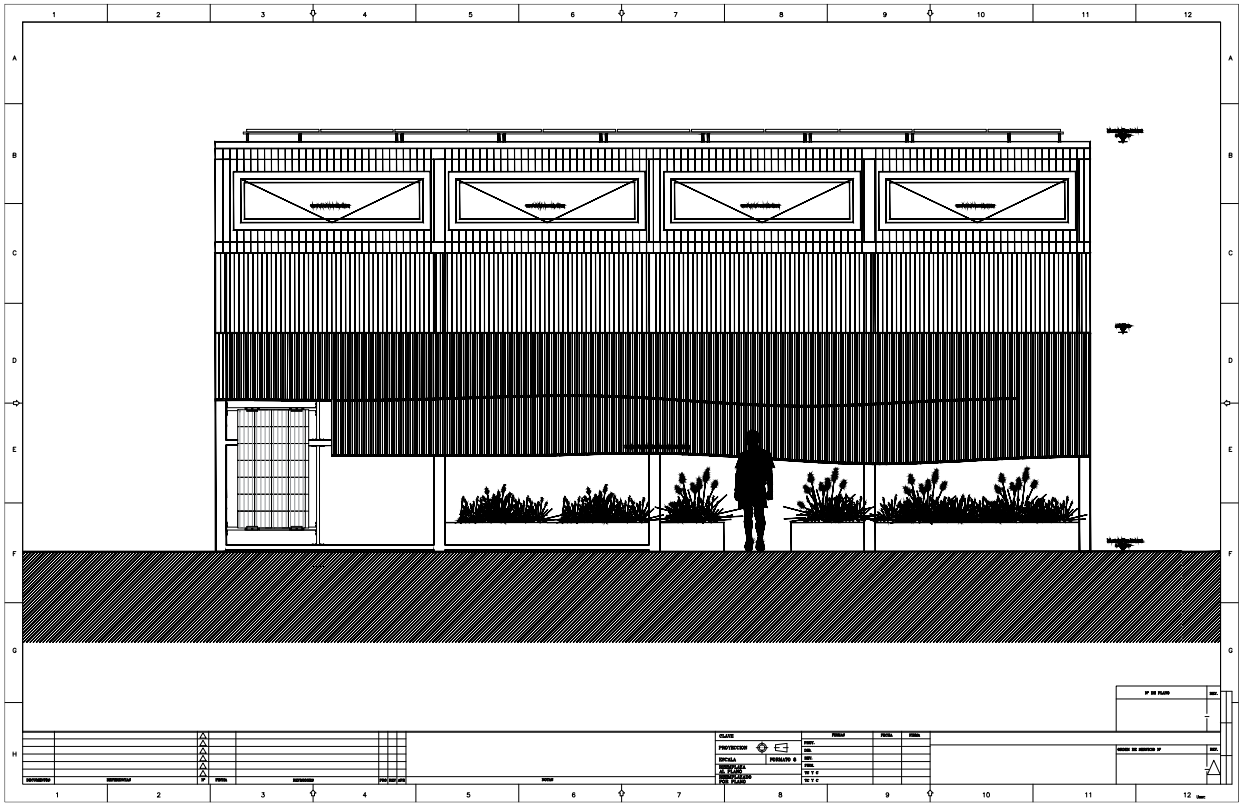
Anexo 6: Hoja de datos módulo bifacial LR6-60BP-300M

Pos	Canti-dad	No. articulo	Descripción de material	Contenido U.V.	Precio bruto U.V.	GD	Des-cuento	Precio neto U.V.	Valor total neto
1	1	520300	Modulo fotovoltaico monocristalino Bifacial, sin marco, tecnología PERC, marca LONGI Solar, modelo LR6-60BP-300M , 300 Wp, 60 celdas	UV = 1 unidad	US$ 338,55	201	60%	US$ 135,42	US$ 135,42
2	1	301251	Enphase Microinverter M250-72-2LN-S2, MC locking connector	UV = 1 unidad	US$ 243,50	160	40%	US$ 146,10	US$ 146,10
3	1	301216	Enphase trunk cable, portrait style, 230V L-N, EUR	UV = 1 unidad	US$ 25,00	160	20%	US$ 20,00	US$ 20,00
4	1	301219	Terminal para cable troncal	UV = 1 unidad	US$ 26,00	160	20%	US$ 20,80	US$ 20,80
5	1	301221	Envoy monitoring system ENV-230-EU-M	UV = 1 unidad	US$ 490,00	199	20%	US$ 392,00	US$ 392,00
6	10	800603	Cable Solar 6 mm2 (General Cable)	UV = 1 m	US$ 1,12	163	20%	US$ 0,90	US$ 8,99
7	1	800101	Weidmüller PV stick, juego de conectores, + / -	UV = 1 juego	US$ 3,88	163	20%	US$ 3,10	US$ 3,10
			Total Materiales						US$ 726,42
			Descuento especial						- US$ 150,00
			Total neto						US$ 576,42
			I.V.A. 19%						US$ 109,52
			TOTAL						**US$ 685,94**

Anexo 7: Presupuesto asociado al sistema de monitoreo y el módulo fotovoltaico bifacial.

Cantidad	Descripción del material	Contenido	Precio unitario	Total
3	4m Perfil C 2x4x0,85 estructural	4m	$ 10.190	$ 30.570
1	Autoperforante hexagonal con golilla 10X3/4 100 unidades	1 caja	$ 5.990	$ 5.990
1	Caja Metálica 500x400x200 mm Ip65 con Puerta Interior Y Placa De Montaje-Bm Electric	1 unidad	$ 69.274	$ 69.274
1	Autoperforante cabeza lenteja 8X 1/2 100 unidades	1 caja	$ 1.430	$ 1.430
1	Riel 3,5 cm 1 m acero galvanizado	1m	$ 2.490	$ 2.490
2	Interruptor automático 6 A curva C 6KA	1 unidad	$ 2.230	$ 4.460
4	Prensacable Pg13	1 unidad	$ 295	$ 1.180
5	CABLE EVA 2,5 MM BLANCO	1m	$ 450	$ 2.250
5	CABLE EVA 2,5 MM ROJO	1m	$ 450	$ 2.250
5	CABLE EVA 2,5 MM VERDE	1m	$ 450	$ 2.250
2	Amarra cables 2,5x100 mm 25 unidades Blanco	1 set	$ 1.020	$ 2.040
1	Set de bases autoadhesivas amarra cables 19x19 mm 50 unidades	1 set	$ 3.520	$ 3.520
1	Cordón 3x1,50 mm 10 m Negro	10m	$ 9.891	$ 9.891
			Total	$ 137.595

Anexo 8: Presupuesto para el diseño de integración de la Figura 34



Anexo 9: Plano invernadero con incorporación del muro bifacial.