

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA UTILIZACIÓN DE  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BIFACIALES CON  
RESPECTO A LOS TRADICIONALES**

PRESENTADO POR:

**CHAFOYA CASTRO, PABLO JOSUÉ**

**LARIOS RIVERA, ELVIS**

**TORRES GARCÍA, JOSÉ ISAAC**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2021

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIO GENERAL:

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA**

SECRETARIO:

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DIRECTOR:

**ING. ARMANDO MARTÍNEZCALDERÓN**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Título:

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA UTILIZACIÓN DE  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BIFACIALES CON  
RESPECTO A LOS TRADICIONALES**

Presentado por:

**CHAFOYA CASTRO, PABLO JOSUÉ**

**LARIOS RIVERA, ELVIS**

**TORRES GARCÍA, JOSÉ ISAAC**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**ING. JORGE ALBERTO ZETINO CHICAS**

SAN SALVADOR, NOVIEMBRE DE 2021

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**ING. JORGE ALBERTO ZETINO CHICAS**

## NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, lunes 11 de octubre de 2021, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 10:00 a.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón  
Director

2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia  
Secretario

  
Firma

  
Firma



Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- MSC. JORGE ALBERTO ZETINO CHICAS  
(Docente Asesor)

- ING. JOSE MIGUEL HERNANDEZ

- MSc. José Wilber Calderón Urrutia

  
Firma

  
Firma

  
Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA UTILIZACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS BIFACIALES CON RESPECTO A LOS TRADICIONALES

A cargo de los Bachilleres:

- CHAFOYA CASTRO, PABLO JOSUÉ

- LARIOS RIVERA, ELVIS

- TORRES GARCÍA, JOSÉ ISAAC

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.1

(Ocho punto uno )

## **DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS.**

### ***Isaac Torres.***

Primeramente, a Dios por estar siempre ayudándome y darme la fortaleza para poder culminar mi carrera universitaria, a mi familia, quienes siempre me apoyaron e incitaron a seguir adelante en mi formación profesional, a mis profesores, quienes forjaron en gran medida mis conocimientos los cuales han sido la base de cada peldaño superado en mi formación, a mis amistades que siempre me animaron a seguir adelante sin perder el objetivo, a Reina Vides por su apoyo en el trabajo de graduación y al ing. Jorge Zetino por guiarnos en el desarrollo del trabajo de graduación.

### ***Pablo Chafoya.***

Agradecerle a Dios primeramente por permitirme culminar esta meta, a mi familia especialmente a mis padres por el apoyo que me dieron para no rendirme, a mis hermanos que siempre estuvieron presentes en el transcurso de mis estudios, apoyándome con sus conocimientos y motivándome a centrarme en la carrera, también agradecer a Reina Vides quien nos dio su apoyo con sus consejos motivándonos a continuar y saber sobrellevar las dificultades, también por guiarnos en los procesos académicos, a su vez agradecer al Ing. Jorge Alberto Zetino Chicas por la paciencia que nos tubo y guiarnos en el proceso del trabajo de graduación.

### ***Elvis Laríos.***

Gracias primeramente al Creador, sin el nada sería posible, a mi familia que ha sido el pilar sobre la que se cimienta cada logro en mi vida, a mi padre que siempre ha creído en mí y me ha brindado su apoyo incondicional, a mi madre que siempre ha estado a mi lado en todo el camino, mi esposa ha sido un gran apoyo para poder lograr este objetivo y muchos otros en la vida. Quiero agradecer a todos y cada uno de los docentes que han formado parte de mi proceso académico de los cuales además de llevarme el conocimiento que me han impartido, he aprendido de cada uno de ellos lecciones que espero aplicar a mi vida, a Reina Vides, que ha sido una importante guía y una luz en este camino, definitivamente sin su ayuda y su guía, difícilmente podría estar alcanzando este logro, por último pero no menos importante agradecer al Ing. Jorge Alberto Zetino Chicas por su asesoría y guía a través de este trabajo de graduación. Hay muchas más personas entre familiares y amigos que han sido parte del viaje, a todos y cada uno gracias por estar ahí.

## Tabla de contenido.

I.	Introducción.....	I
II.	Descripción del tema.....	II
III.	Objetivos.....	II
IV.	Alcances.....	II
V.	Antecedentes.....	III
VI.	Planteamiento del problema.....	III
VII.	Justificación.....	III
	Capítulo 1. Energía solar fotovoltaica.....	1
	1.1.1 Energías no renovables y renovables.....	1
	1.2 La energía solar fotovoltaica en el futuro.....	5
	1.2.1 Agentes que influyen en la viabilidad de las energías renovables.....	5
	1.3 Operación de un panel fotovoltaico.....	5
	1.3.1 Célula fotovoltaica.....	5
	1.3.2 Funcionamiento de la célula fotovoltaica.....	6
	1.3.3 Modelo de una célula fotovoltaica.....	7
	1.3.4 Tipos de célula fotovoltaica.....	8
	1.3.5 Curva característica V-I de una célula fotovoltaica.....	10
	1.3.6 Conexión de células.....	11
	1.3.7 Características del módulo fotovoltaico.....	13
	1.4 Orientación e inclinación óptima de los paneles fotovoltaicos.....	18
	Capítulo 2. Tipos de sistemas fotovoltaicos, capacidades de módulos bifaciales y elementos de instalación.....	20
	2.1 Operación de la instalación.....	20
	2.1.1 Sistema fotovoltaico conectado a la red.....	20
	2.1.2 Sistema fotovoltaico aislado.....	21
	2.1.3 Sistema fotovoltaico híbrido.....	22
	2.2 Capacidades de los paneles bifaciales.....	22
	2.3 Elementos de la instalación.....	24
	2.3.1 Módulo fotovoltaico.....	24
	2.3.2 Estructuras de sujeción de módulos.....	24

2.3.3	Regulador.....	24
2.3.4	Baterías.....	25
2.3.5	Inversor.....	25
2.3.6	Aparatos de Protección.....	25
2.3.7	Contadores de energía.....	25
Capítulo 3. Tecnologías fotovoltaicas y simulación de diseño bifacial en PVsyst.....		26
3.1	Avances tecnológicos en módulos fotovoltaicos.....	26
3.1.1	Paneles Multi Bus bar.....	26
3.1.2	PERC (Passivated Emitter Rear Cell).....	26
3.1.3	Paneles Half Cell.....	27
3.1.4	Paneles Dual Glass.....	28
3.1.5	Paneles Bi-faciales (doble cara).....	28
3.1.6	Otros.....	29
3.2	Diferentes tecnologías bifaciales.....	30
3.2.1	Diferencias entre tecnologías de la familia Swan de panel, bifacial hoja posterior transparente y bifacial doble vidrio.....	33
3.3	Factores importantes en la eficiencia de paneles fotovoltaicos.....	39
3.3.1	Factor bifacial.....	39
3.3.2	Geometría de la instalación.....	57
3.3.3	El albedo.....	59
3.4	Importancia del albedo.....	59
3.5	Latitud.....	60
3.6	Estructura de la instalación.....	61
Capítulo 4. Diseño e instalación de pequeña planta monofacial y bifacial.....		63
4.1	Diseño del panel monofacial.....	63
4.1.1	Sistema fotovoltaico conectado en red.....	63
4.1.2	Criterios de dimensionamiento del inversor.....	64
4.1.3	Efectos de la temperatura en el panel monofacial.....	65
4.2	Diseño de la generación del panel bifacial.....	66
4.2.1	Características del microinversor.....	68
4.2.2	Inclinación de panel solar.....	70
4.3	Estructura de soporte del panel bifacial.....	71

Capítulo 5. Comparación de la producción fotovoltaica monofacial con la producción bifacial. 74

5.1	Comparación de la producción.....	74
5.1.1	Sobre superficie de concreto a 2 metros de altura con albedo de 0.30.....	75
5.1.2	Sobre superficie de concreto a 1 metros de altura con albedo de 0.30.....	79
5.1.3	Sobre superficie blanca a 1 metros de altura con albedo de 0.80.....	83
5.1.4	Sobre superficie blanca a 2 metros de altura con albedo de 0.80.....	87
5.1.5	Sobre superficie verde a 2 metros de altura con albedo de 0.16.....	91
5.1.6	Sobre superficie verde a 1 metros de altura con albedo de 0.16.....	95
5.1.7	Sobre superficie café a 1 metros de altura con albedo de 0.10.....	99
5.1.8	Sobre superficie café a 2 metros de altura con albedo de 0.10.....	103
5.1.9	Sobre superficie negra a 2 metros de altura con albedo de 0.07. ....	107
5.1.10	Sobre superficie negra a 1 metros de altura con albedo de 0.07. ....	111
5.2	Porcentaje de generación vrs costo. ....	118
5.2.1	Presupuesto de Equipo a Utilizar. ....	118
5.2.2	Tiempo en recuperar la inversión ....	118
	Conclusiones.....	121
	Recomendaciones.....	122
	Bibliografía. ....	123
	Anexos. ....	125

## Figuras

Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema de generación de energía eléctrica basado en fuentes no renovables. ....	1
Figura 2. Funcionamiento de la célula fotovoltaica comparada con la del diodo. ....	6
Figura 3. Modelo equivalente de una célula fotovoltaica. ....	7
Figura 4. Célula bifacial de perovskita. ....	9
Figura 5. Célula bifacial de silicio. ....	10
Figura 6. Curva de tensión corriente de una célula fotovoltaica. ....	10
Figura 7. Conexión de células. a) conexión en serie, b) conexión paralela. ....	11
Figura 8. Conexión de células en serie para formar módulo fotovoltaico. ....	12
Figura 9. Conexión entre células. ....	13
Figura 10. Módulo fotovoltaico bifacial DUOMAX Twin de 445W. ....	14
Figura 11. Curvas de I-V del panel fotovoltaico bifacial DUOMAX TWIN de 445W. ....	17
Figura 12. Variación de la tensión y la corriente bajo diferentes temperaturas. ....	18
Figura 13. Orientación e inclinación de un sistema fotovoltaico. ....	19
Figura 14. Sistema Conectado a la Red. ....	20
Figura 15. Sistema Fotovoltaico Aislado. ....	21
Figura 16. Sistema Fotovoltaico Hibrido. ....	22
Figura 17. Cintas que conectan las celdas fotovoltaicas llamadas bus bar. ....	26
Figura 18. Panel Half Cell. ....	27
Figura 19. Paneles Longi con hasta 30 años de garantía. ....	28
Figura 20. Paneles bifaciales doble cara. ....	29
Figura 21. Módulos fotovoltaicos bifaciales y monofaciales. ....	30
Figura 22. Diferentes aplicaciones de los paneles fotovoltaicos. ....	31
Figura 23. Diferentes tecnologías bifaciales. ....	32
Figura 24. Tecnología tiger con cambio de bus bar 9. ....	32
Figura 25. Paneles bifaciales de doble vidrio. ....	33
Figura 26. Curva de desempeño de diferentes irradiancias. ....	34
Figura 27. Modulo bifacial Duomax Twin. ....	35
Figura 28. Datos eléctricos modulo bifacial Duomax Twin. ....	35
Figura 29. Características eléctricas del lado posterior del módulo bifacial Duomax Twin. ....	36
Figura 30. Modulo bifacial Duomax Twin. ....	36
Figura 31. Modulo bifacial Duomax Twin. ....	36
Figura 32. Conectores Y MC4, unión en paralelo de paneles monofaciales ....	37
Figura 33. Entorno del programa PVSyst 7.2. ....	40
Figura 34. Entorno para los diferentes parámetros de la instalación fotovoltaica conectada a la red. ....	41
Figura 35. Ventana para agregar los datos meteorológicos del lugar de la instalación. ....	42
Figura 36. Ventana para agregar los datos meteorológicos del lugar de la instalación. ....	42
Figura 37. Configuración de la orientación óptima de los paneles fotovoltaicos. ....	43

Figura 38. Selección del módulo fotovoltaico y el inversor para la simulación. ....	44
Figura 39. <i>Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico</i> .....	45
Figura 40. Tamaños del módulo fotovoltaico bifacial.....	46
Figura 41. Parámetros eléctricos del inversor. ....	46
Figura 42. Curva de eficiencia del inversor. ....	47
Figura 43. Definición de las pérdidas de la instalación.....	47
Figura 44. Curva de pérdidas de la instalación. ....	48
Figura 45. Pérdidas detrás del plano de la instalación. ....	48
Figura 46. Curva de distribución normal de la producción del sistema fotovoltaico. ....	49
Figura 47. Estudio económico de la instalación. ....	49
Figura 48. Resultados obtenidos de la simulación. ....	50
Figura 49. Especificaciones eléctricas del módulo LG400N2T-A5.....	50
Figura 50. Irradiancia en función del albedo en condiciones STC. ....	51
Figura 51. Conexión de sistema bifacial.....	53
Figura 52. Configuración de la orientación y la distancia de paso. ....	55
Figura 53. Diseño del sistema seleccionando panel y el inversor. ....	56
Figura 54. Configuración de albedo y altura sobre el suelo. ....	56
Figura 55. Resultado obtenido de la simulación de PVsist.....	57
Figura 56. Altura respecto al suelo influye en el área reflejada.....	57
Figura 57. Ganancia vs elevación del módulo de guía de diseño bifacial LG [8]. ....	58
Figura 58. A mayor distancia los arreglos de paneles se tiene mayor reflexión.....	58
Figura 59. Ganancia con respecto al albedo.....	60
Figura 60. Distancia entre la fila anterior y siguiente.....	61
Figura 61. Diferentes estructuras de arreglos de paneles bifaciales.....	61
Figura 62. Estructura de soporte para paneles bifaciales. ....	62
Figura 63. Panel monofacial AS-6P30 de 280Wp.....	65
Figura 64. Conexión de dos módulos monofaciales para formar un bifacial. ....	67
Figura 65. Microinversor solarEpic de 1000W.....	68
Figura 66. Estructura de soporte con marco para módulo bifacial. ....	71
Figura 67. Estructura de soporte con marco para módulo bifacial. ....	72
Figura 68. Estructura de soporte propuesta para modulo bifacial. ....	73
Figura 69. Foto de la superficie de concreto a la altura de 2m.....	75
Figura 70. Foto de la superficie de concreto a la altura de 1m.....	79
Figura 71. Foto de la superficie de concreto pintado de blanco a la altura de 1m. ....	83
Figura 72. Foto de la superficie de concreto pintado de blanco a la altura de 2m. ....	87
Figura 73. Foto de la superficie de concreto pintado de verde a la altura de 2m. ....	91
Figura 74. Foto de la superficie de concreto pintado de verde a la altura de 1m. ....	95
Figura 75. Foto de la superficie de concreto pintado de café a la altura de 1m. ....	99
Figura 76. Foto de la superficie de concreto pintado de café a la altura de 2m. ....	103
Figura 77. Foto de la superficie de concreto pintado de negro a la altura de 2m.....	107
Figura 78. Foto de la superficie de concreto pintado de negro a la altura de 1m.....	111

## Tablas.

Tabla 1. Tipos de células de silicio cristalino.....	8
Tabla 2. Datos eléctricos para la parte frontal del panel fotovoltaico bifacial DUOMAX TWIN bajo condiciones STC. ....	14
Tabla 3. Datos eléctricos para la parte posterior del panel fotovoltaico bifacial DUOMAX TWIN bajo condiciones STC. ....	15
Tabla 4. Datos eléctricos del panel fotovoltaico bifacial DUOMAX TWIN bajo condiciones NMOT.....	15
Tabla 5. Datos mecánicos del panel fotovoltaico bifacial DUOMAX TWIN de 445W. ....	15
Tabla 6. Coeficientes de temperatura del del panel fotovoltaico bifacial DUOMAX TWIN de 445W.....	16
Tabla 7. Rango de temperatura y valores máximo de tensión y corriente de operación del panel fotovoltaico bifacial DUOMAX TWIN de 445W. ....	16
Tabla 8. Fabricantes de paneles solares bifaciales y capacidades.....	23
Tabla 9. Datos obtenidos de forma manual.....	52
Tabla 10. Datos proporcionados por PVsyst en ambas condiciones de temperatura. ...	57
Tabla 11. Resultados de Voc y Vmp para la temperatura de Celda en San Salvador. .	66
Tabla 12. Datos eléctricos de microinversor SolarEpic de 1000W.....	70
Tabla 13. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 2m en superficie de concreto. ....	76
Tabla 14. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 1m en superficie de concreto. ....	80
Tabla 15. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 1m en superficie blanca. ....	84
Tabla 16. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 2m en superficie blanca. ...	88
Tabla 17. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 2m en superficie verde. ...	92
Tabla 18. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 1m en superficie verde. ...	96
Tabla 19. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 1m en superficie café.....	100
Tabla 20. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 2m en superficie café.....	104
Tabla 21. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 2m en superficie de negra. ....	108
Tabla 22. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 1m en superficie de negra. ....	112
Tabla 23. Promedio de irradiancias para cada superficie a la altura de 1m y 2m. ....	115
Tabla 24. Comparación de eficiencias en panel bifacial y monofacial. ....	116
Tabla 25. Presupuesto de gastos para el desarrollo de la instalación. ....	118
Tabla 26. Costos de mano de obra de la instalación. ....	119

## Gráficos.

Gráfico 1. Recorrido del sol durante un año para el lugar definido. ....	43
Gráfico 2. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos en superficie de concreto. .....	77
Gráfico 3. Eficiencias generadas por los paneles a 2m del suelo con superficie de concreto. ....	78
Gráfico 4. Potencias generadas por los paneles a una altura de 1m con superficie de concreto. ....	81
Gráfico 5. Eficiencias generadas por los paneles a 1m del suelo en concreto.....	82
Gráfico 6. Eficiencias generadas por los paneles a 1m del suelo blanco.....	85
Gráfico 7. Potencias generadas por los paneles en superficie blanca a 1m del suelo..	86
Gráfico 8. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos a 2m en suelo blanco..	89
Gráfico 9. Eficiencias generadas por los paneles a 2m del suelo blanco.....	90
Gráfico 10. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos a 2m en suelo verde...	93
Gráfico 11. Eficiencias generadas por los paneles a 2m del suelo verde. ....	94
Gráfico 12. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos a 1m en superficie verde. .....	97
Gráfico 13. Eficiencias generadas por los paneles a 1m del suelo con verde.....	98
Gráfico 14. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos a 1m en superficie café. .....	101
Gráfico 15. Eficiencias generadas por los paneles a 1m del suelo con superficie café. .....	102
Gráfico 16. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos a 2m del suelo con superficie café. ....	105
Gráfico 17. Eficiencias generadas por los paneles a 2m del suelo con superficie café. .....	106
Gráfico 18. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos a 2m del suelo en superficie negra.....	109
Gráfico 19. Eficiencias generadas por los paneles a 2m del suelo con superficie negra. .....	110
Gráfico 20. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos en superficie negra a 1m. .....	113
Gráfico 21. Eficiencia producida para superficie negra a 1m del suelo. ....	114
Gráfico 22. Comparación de ganancia bifacial en distintos albedos. ....	116
Gráfico 23. Comparación de eficiencias monofacial y bifacial en albedos a altura de 1m. .....	117
Gráfico 24. Comparación de eficiencias monofacial y bifacial en albedos la altura de 2m. .....	117
Gráfico 25. Degradación anual del panel. ....	120

## **I. Introducción.**

La creciente demanda en el consumo de energía eléctrica y el costo para generarla con fuentes convencionales que no son sostenibles, porque son limitadas y deterioran el medio ambiente, ha hecho que el ahorro energético sea un tema primordial, por ello se desarrolla el diseño y aplicación de las fuentes renovables.

En la búsqueda de sistemas alternos para los combustibles fósiles, en la actualidad las fuentes renovables poseen un desarrollo continuo. Dentro de las tecnologías de energías renovables se encuentra la energía fotovoltaica, la cual posee diferentes tecnologías que son clasificadas según sus características y los materiales empleados para su fabricación, entre las celdas fotovoltaicas que se fabrican con silicio cristalino se encuentran las monocristalinas y policristalinas.

El desarrollo de este trabajo se basará en celdas de silicio cristalino, con paneles fotovoltaicos monofaciales y bifaciales. Los paneles fotovoltaicos monofaciales como su nombre lo indica, captan los fotones en una sola cara, para poder generar corriente. Los paneles fotovoltaicos bifaciales captan los fotones en la cara frontal y en la cara posterior, es decir, estos pueden generar corriente en ambas caras aumentando la corriente generada, comparado con un panel monofacial. En este trabajo se desarrolla el estudio de las diferentes características de ambos paneles como también el diseño y la instalación de los mismos, para poder obtener el incremento en la producción de energía de un módulo bifacial con respecto al monofacial.

## **II. Descripción del tema.**

Dentro del ámbito de las energías renovables, la tecnología ha venido avanzando y con ello se han desarrollado innovaciones como la generación fotovoltaica, la cual consiste en el aprovechamiento de la energía solar. Dentro de esta tecnología se han desarrollado una variedad de módulos fotovoltaicos que han mejorado su eficiencia, con el mayor aprovechamiento del recurso solar, entre estos se encuentra la tecnología de módulos fotovoltaicos bifaciales en la cual hay un mejor aprovechamiento de la energía en ambos lados del módulo, dentro del estudio se considerará una comparación de la producción de un módulo tradicional con respecto a un módulo bifacial.

## **III. Objetivos.**

General.

- ✓ Comparar la producción de un módulo fotovoltaico tradicional con respecto a un módulo bifacial.

Específicos.

- ✓ Hacer uso de un módulo fotovoltaico bifacial, obtener sus datos de producción de energía eléctrica.
- ✓ Hacer uso de un módulo fotovoltaico tradicional para obtener sus datos de producción de energía eléctrica.
- ✓ Comparar los datos de producción de ambos módulos fotovoltaicos.

## **IV. Alcances.**

El proyecto comprende el desarrollo de las pruebas necesarias a cada uno de los módulos fotovoltaicos tradicional y bifacial, como también el diseño y la construcción de una pequeña planta generadora con los módulos anteriormente mencionados.

## **V. Antecedentes.**

La energía fotovoltaica ha disminuido el uso de energías convencionales y esto contribuye en parte a la disminución del calentamiento global. En el mundo se ha ido en busca de nuevas tecnologías para disminuir el uso de energía convencional.

## **VI. Planteamiento del problema.**

En la producción de energía eléctrica con paneles fotovoltaicos tradicionales hay energía del sol que se desaprovecha, debido a las características del panel fotovoltaico, debido a eso se busca una forma más eficiente de aprovechar la energía del sol que no se utiliza.

## **VII. Justificación.**

Haciendo uso de los paneles fotovoltaicos bifaciales, aprovechamos parte de la energía del sol que con paneles fotovoltaicos tradicionales no se aprovecha, aumentando el nivel de producción, a la vez los módulos bifaciales son un poco más duraderos y resistentes a los rayos UV ya que están contruidos para recibir la energía del sol por ambos lados.

# Capítulo 1. Energía solar fotovoltaica.

## 1.1 Introducción a las energías renovables.

### 1.1.1 Energías no renovables y renovables.

**Energías no renovables:** son aquellas en las cuales las fuentes primarias de energía se agotan al transformar su energía en energía útil.

**Las principales energías no renovables son:**

- ✚ Energía basada en combustibles fósiles como: carbón, petróleo y gas natural.
- ✚ Energía nuclear basada en materiales radioactivos como el uranio.



*Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema de generación de energía eléctrica basado en fuentes no renovables.*

**Energías renovables:** Son aquellas en las que la fuente primaria de energía la produce la naturaleza sin realizar ningún tratamiento previo por el hombre.

**Las principales energías renovables son:**

- ✚ Energía geotérmica.
- ✚ Energía solar.
- ✚ Energía eólica.
- ✚ Energía de biomasa.
- ✚ Energía hidráulica.

- ✚ Energía mareomotriz.

### **Energía geotérmica.**

La energía primaria es la inercia térmica de la tierra y el calor de la tierra, con el cual se aprovechan las temperaturas altas en el interior de la tierra, donde se inyecta un fluido que esté frío, para luego recuperarlo con una mayor temperatura, dependiendo del valor de esta temperatura se utiliza para diferentes aplicaciones.

#### **Las aplicaciones son:**

- ✚ En lugares sin actividad volcánica se usa el intercambio de calor en el subsuelo, utilizando bombas de calor la cual es un aparato con un funcionamiento que se basa en la termodinámica, el proceso consiste en transportar la energía que se encuentra en forma de calor de un ambiente a otro, se puede obtener agua caliente en épocas frías.
- ✚ En lugares donde hay actividad volcánica se pueden tener temperaturas en el rango de 70 y 450 grados Celsius, por lo que puede ser utilizada para la calefacción o también para la generación de energía eléctrica.

### **Energía solar térmica.**

La fuente primaria es la luz solar, que es aprovechada para poder calentar fluidos ya sea de agua u otros componentes.

#### **Las aplicaciones son las siguientes.**

- ✚ Generación de electricidad a partir del vapor de agua generado en centrales de potencias elevadas.
- ✚ Generación de agua caliente sanitaria y calefacción a partir de paneles solares térmicos en instalaciones domésticas o industrias de potencia bajas o medias.

#### **Aplicaciones en baja temperatura hasta 100 °C.**

- ✚ Hasta 40 °C. Se pueden calentar agua de piscinas.
- ✚ Entre 40 °C y 70 °C. Se pueden utilizar colectores planos de alto rendimiento de vacío y también calefacción a bajas temperaturas
- ✚ Entre 70 °C y 100 °C. Se pueden utilizar colectores de vacío o captadores planos para calefacción, para agua de procesos industriales a baja temperatura y también para refrigeración solar.

#### **Aplicaciones en media temperatura entre 100°C y 400 °C.**

- ✚ Colectores de calefacción.
- ✚ Refrigeración solar.
- ✚ Procesos industriales de alta temperatura.

#### **Aplicaciones en alta temperatura mayor a 400 °C.**

- ✚ Centrales termosolares.

## **Energía fotovoltaica.**

Se aprovecha la luz solar para generar electricidad a través de una célula fotovoltaica, que produce electricidad directamente por la radiación solar incidente en un semiconductor, comúnmente es de silicio, con la interconexión de estas células se forman los módulos fotovoltaicos. La generación de esta electricidad se puede conectar a la red a través de convertidores como el inversor que convierte de DC (Corriente Directa) a AC (Corriente Alterna) o también para sistemas aislados para almacenar la energía en baterías, se utilizan convertidores DC a DC y reguladores de carga.

### **Las principales características de la energía fotovoltaica son:**

- ✚ La eficiencia no depende del tamaño, sino que depende de la construcción de las células y sus características técnicas con eficiencias del 6% con silicio amorfo hasta eficiencias del 21% con celdas con contactos posteriores.
- ✚ Permite generar electricidad donde la electrificación es difícil.
- ✚ La contaminación es mínima, debido a que se utiliza energías convencionales para construirlo.
- ✚ Al no poseer partes móviles es silenciosa.
- ✚ Es de fácil electrificación en zonas aisladas.

## **Energía eólica.**

La energía primaria es la energía cinética del movimiento del aire para obtener el movimiento de unas aspas que moverán un generador para obtener electricidad y luego inyectarla en la red.

### **Formas de generar electricidad:**

- ✚ Mediante un acoplamiento directo a la red de suministro.
- ✚ Mediante un inversor de conexión a red.

La generación de energía eólica tiene aplicaciones para conexión a red y para sistemas aislados, como la fotovoltaica también es usada para bombeo de agua.

## **Energía biomasa.**

La transformación de biomasa se hace por medio de métodos termoquímicos como son la combustión pirólisis, el cual es un proceso de degradación térmica de una sustancia en ausencia del oxígeno, debido a esto las sustancias se descomponen por medio del calor, lo cual no permite que se produzcan las reacciones de combustión. Como también por métodos biológicos como la fermentación, que consiste en un proceso químico, de oxidación incompleta teniendo como resultado un compuesto orgánico.

## **Energía hidráulica.**

La energía primaria es la energía potencial del agua, donde la generación eléctrica se acopla a la red de suministro, la altura mínima del salto deberá ser de aproximadamente 6m. Con este tipo de energía se tienen problemas medioambientales debido a que la construcción de nuevas presas en épocas de sequía desabastece el flujo del agua.

## **Energía mareomotriz.**

Es la energía generada por el mar, es decir la energía de las mareas donde se requieren alrededor de 5m entre pleamar (nivel más alto del agua) y bajamar (nivel más bajo del agua). Esta energía está disponible en cualquier época del año y cualquier clima todo y cuando cumpla una serie de condiciones.

### **1.1.1.1 Problemática con las energías renovables.**

- ✚ Generación imprevisible en algunos casos, como en la fotovoltaica y la eólica.
- ✚ La disponibilidad temporal de los recursos renovables no suele coincidir con las necesidades de energía demandada por los usos residenciales e industriales.
- ✚ El almacenamiento de los excedentes de energía a partir de fuentes renovables es factible, pero significa un costo adicional.

## **Almacenamiento de la energía.**

El almacenamiento de energía se puede hacer de distintas formas como almacenar en energía química en baterías y supercondensadores, almacenamiento en energía hidráulica es decir hacer saltos de agua artificiales, energía térmica en tanques fundantes a altas temperaturas, energía mecánica como volantes de inercia, aire comprimido y en almacenamiento en hidrogeno con pilas de combustible.

Energía química en baterías y supercondensadores aplicaciones.

- ✚ Electrificación rural en instalaciones aisladas.
- ✚ Conexiones a la red con balances netos y niveles de autoconsumo elevados.
- ✚ Gestión de generación-consumo en horas valle y punta.
- ✚ Mejora de la calidad de suministro eléctrico: alisamiento de carga, control de frecuencia en red, suministros de picos de demanda, reducción de cortes de suministro.

Las baterías trabajan en el régimen continuo y los supercondensadores responden bien a los transitorios rápidos.

Almacenamiento de energía hidráulica, cuando hay exceso de energía se almacena agua en un nivel mayor para en momentos de mayor demanda se utilizan.

Almacenamiento de energía térmica, esta se almacena en tanques para luego utilizarla para mover un generador y suministrarla a la red.

Almacenamiento de energía mecánica con volantes de inercia, en esta no se puede almacenar grandes cantidades de energía.

Energía mecánica en aire comprimido para luego convertirla en energía eléctrica.

Almacenamiento de energía por medio de la pila de combustible donde se utiliza el hidrogeno.

## **1.2 La energía solar fotovoltaica en el futuro.**

Se pretende integrar la energía en un conjunto sostenible con sistemas de generación distribuida con fotovoltaica eólica con elementos de almacenamiento como pueden ser baterías microturbinas o sistemas virtuales con redes virtuales para el suministro de la energía eléctrica.

### **1.2.1 Agentes que influyen en la viabilidad de las energías renovables.**

Tenemos que percibir cómo funcionan las energías renovables, el reglamento existente que regulan las mismas.

La correcta implantación de la energía renovable depende de:

- ✚ Desarrollo de modelos económicos que consideren los costos de adquisición, funcionamiento, mantenimiento y sustitución.
- ✚ Legislación energética de apoyo a tecnologías sostenibles que sea estable en el tiempo.
- ✚ Financiación estable de actividades basadas en energías renovables.
- ✚ Propiciar unas condiciones de mercado adecuadas para que la iniciativa privada participe en los nuevos modelos energéticos.

## **1.3 Operación de un panel fotovoltaico.**

### **1.3.1 Célula fotovoltaica.**

En el año 1839 el físico francés Edmon Becquerel descubre el efecto fotovoltaico [1]: este efecto se observó a través de algunos materiales semiconductores los cuales son capaces de producir una corriente eléctrica cuando se exponen a la luz solar.

En el año de 1954 Chapín, Fuller y Pearson de Bell Telephone desarrollan la primera célula solar [1].

En 1958 se usó por primera vez las células fotovoltaicas en el satélite Vanguard [1].

### 1.3.2 Funcionamiento de la célula fotovoltaica.

Las células fotovoltaicas generan una fuerza electromotriz la cual genera una corriente que es proporcional a la irradiancia que incide sobre ellas. Las células fotovoltaicas se crean con la unión de materiales de tipo P y tipo N a partir de silicio semiconductor [2].

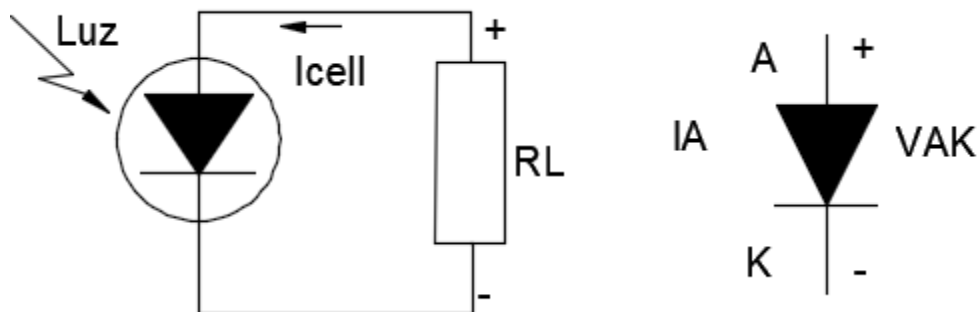


Figura 2. Funcionamiento de la célula fotovoltaica comparada con la del diodo.

En la Figura 2 se observa el comportamiento de una célula fotovoltaica comparada con el funcionamiento de un diodo, en él se identifican sus partes como el ánodo (A), el cátodo (K), la corriente ( $I_A$ ) y la diferencia de potencial en sus terminales ( $V_{AK}$ ). En la oscuridad la célula fotovoltaica se comporta de la misma forma que el diodo, pero cuando es expuesta a la luz solar se comporta de forma diferente debido a que, en vez de consumir energía, la energía se genera y esta cantidad dependerá de las características de fabricación de la célula y la irradiancia solar en la superficie de la célula.

### 1.3.3 Modelo de una célula fotovoltaica.

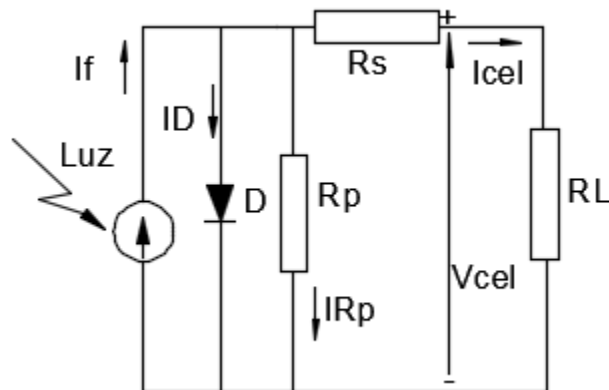


Figura 3. Modelo equivalente de una célula fotovoltaica.

En la Figura 3  $I_f$  es una fuente de corriente directa donde el valor de esta es igual a la corriente máxima que puede generar la célula fotovoltaica. El diodo D representa la unión de semiconductores de tipo P y N.  $R_p$  es la resistencia debido a la no idealidad de la unión P-N y a las impurezas cercanas a la unión los valores típicos son entre 200 y 300  $\Omega$  [3].  $R_s$  representa la resistencia del volumen del material y de los contactos metálicos los valores típicos andan entre 0.05 y 0.3  $\Omega$  [4].

La ecuación de la corriente generada por una célula fotovoltaica se aproxima por la expresión siguiente:

$$I_{cel} = I_f - I_0 \left( e^{\frac{q(V_{cel} + I_{cel}R_s)}{mKT}} - 1 \right) - \frac{V_{cel} + I_{cel}R_s}{R_p}$$

Donde:

$I_{cel}$ : Corriente generada por la célula.

$I_f$ : corriente máxima generada por la célula.

$I_0$ : Corriente de oscuridad

$m$ : Factor de idealidad del diodo.

$V_{cel}$ : Tensión de salida de la célula.

$R_s$ : Resistencia serie.

$R_p$ : Resistencia paralelo.

q: Magnitud de carga del electrón =  $1.60 \times 10^{-19}$  C.

K: Constante de Boltzmann =  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K.

T: Temperatura absoluta(K).

### 1.3.4 Tipos de célula fotovoltaica.

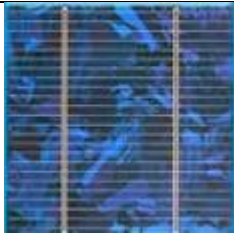

Tipo de célula	Rango de eficiencia (%)	Forma de la célula	Características
Silicio monocristalino.	15 – 18		Tiene una estructura cristalina uniforme y esta se fabrica en lingotes en forma de cilindros de gran pureza los cuales son cortados en obleas, por lo tanto, consume bastante energía su construcción.
Silicio policristalino	12 – 14		Posee una estructura cristalina no uniforme, es fabricado con moldes rectangulares y tiene un menor costo que el silicio monocristalino.
Silicio amorfo	6 – 9		Tiene una estructura no cristalina y la potencia generada es degradada con el tiempo de utilización, se puede colocar como una capa muy fina en diferentes tipos de soporte e inclusive pueden ser flexibles y tienen un bajo costo de fabricación.

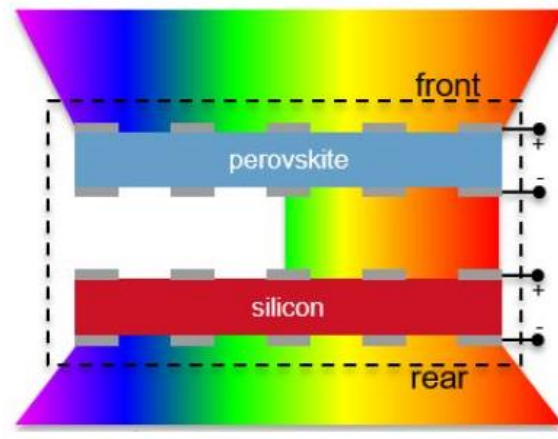
Tabla 1. Tipos de células de silicio cristalino.

#### 1.3.4.1 . Célula bifacial tándem de perovskita.

Perovskita es un trióxido de titanio y de calcio el cual se cristaliza en un sistema cristalino ortorrómbico. Este mineral fue descubierto en los montes Urales en Rusia por Gustav Rose en el año de 1839, y su nombre se debe al minero ruso, L.A Perovski (1792-1856) [5]. Este tipo de material al igual que el silicio es utilizado para la generación de energía solar fotovoltaica.

La Célula bifacial tándem de perovskita fue creado aplicando una célula de perovskita sobre una célula de silicio cristalino bifacial. Según los investigadores esta célula resultante capta mejor la luz solar, debido a que se ha optimizado para la cara frontal, la

cual captura los fotones de alta energía mientras que para la cara posterior capta fotones de menor energía.



*Figura 4. Célula bifacial de perovskita.*

En la Figura 4 se puede observar que la célula fotovoltaica consta de 4 terminales esto significa que posee circuitos separados es decir como dos paneles monofaciales uno para la cara frontal y otra para la cara posterior, con esto es posible el ajuste dinámico y la optimización del rendimiento energético. Dos terminales de salida son de la célula de perovskita ya que son dos materiales distintos con el silicio, así mismo la célula de silicio que es la que está en el lado posterior tiene los otros dos terminales de salida.

Los investigadores de la célula postulan haber utilizado el concepto “eficiencia bifacial equivalente” para poder medir la eficiencia de la célula. La eficiencia bifacial equivalente se obtiene al calcular la eficiencia que una célula monofacial requeriría para generar la misma cantidad de energía que genera la célula bifacial anualmente en las mismas condiciones de operación. Según el método descrito anteriormente se obtiene que la célula tiene una eficiencia del 30.2% superando el límite de las células monofaciales. [5]

#### **1.3.4.2 Célula bifacial de silicio.**

La célula bifacial de silicio trata de una célula de silicio monocristalina de tipo-n de doble capa diseñada para aumentar la salida de potencia, están diseñadas para absorber la luz desde ambos lados, construido de silicio superior para que la carga eléctrica fotogenerada pueda ser aportada desde el diseño de contacto delantero y trasero, esta tecnología mejorada de la oblea, minimiza la degradación dando por resultado un funcionamiento más largo y más fuerte. El diseño incluye un encapsulado transparente de mayor resistencia y un diseño sin marco optimizado, combinado con una caja de conexiones reducida [6].

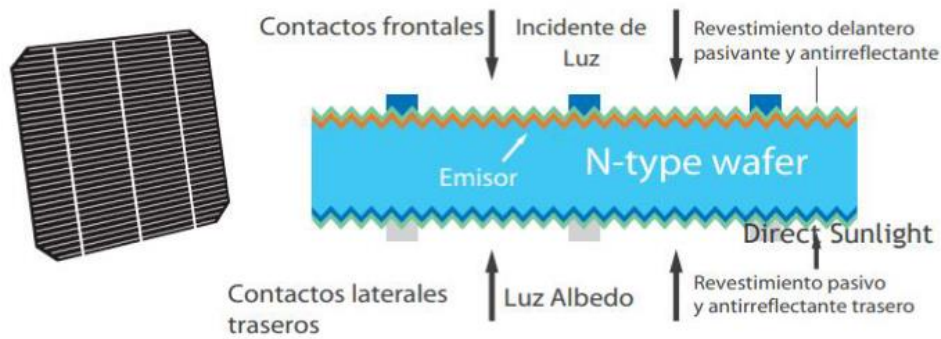


Figura 5. Célula bifacial de silicio.

Los módulos fotovoltaicos fabricados con esta célula poseen solo dos terminales de salida a diferencia de los bifaciales de perovskita ya que en esta célula tanto el lado frontal como el posterior están conectados a la misma célula debido a que son del mismo material, mientras que en el de perovskita se usaban dos células una de perovskita y otra de silicio.

### 1.3.5 Curva característica V-I de una célula fotovoltaica.

En la célula debido a la unión P-N esta se asemeja a un diodo. Pero se caracteriza por una tensión de vacío o circuito abierto  $V_{oc}$ , una intensidad de cortocircuito  $I_{sc}$  y por un punto de máxima potencia MPP.



Figura 6. Curva de tensión corriente de una célula fotovoltaica.

### 1.3.6 Conexión de células.

La célula solar por si sola genera poca potencia eléctrica con una tensión de trabajo bastante baja, por ello para obtener un módulo de mayor potencia y tensión de trabajo es necesario la conexión de células en serie.

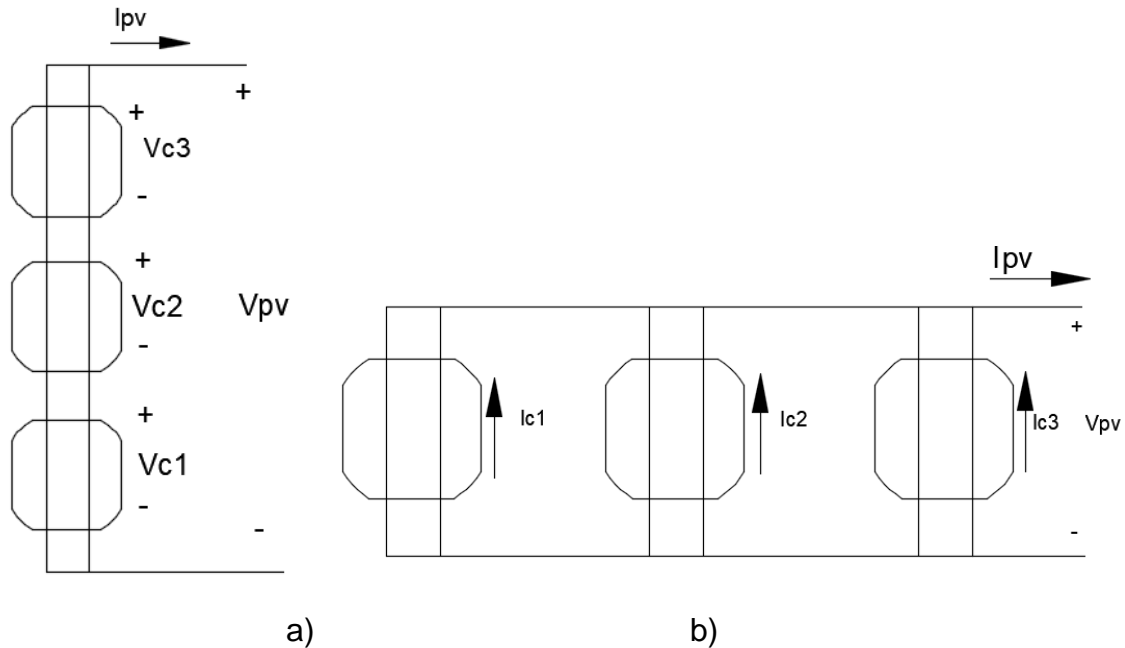


Figura 7. Conexión de células. a) conexión en serie, b) conexión paralela.

Para una conexión en serie de células fotovoltaicas la corriente que circula en ellas es la misma, no obstante, la tensión dependerá del número de células conectadas en serie como se observa en la Figura 7a) donde las tensiones de las células se sumarían dando como resultado la tensión del panel fotovoltaico, de manera más generalizada en una conexión en serie de células fotovoltaicas, la tensión será la suma de todas las tensiones de las células.

$$V_{pv} = \sum V_{cn}$$

También se puede obtener simplemente al multiplicar el número de células por la tensión de una célula, debido a que la tensión en las células es la misma.

$$V_{pv} = nV_c$$

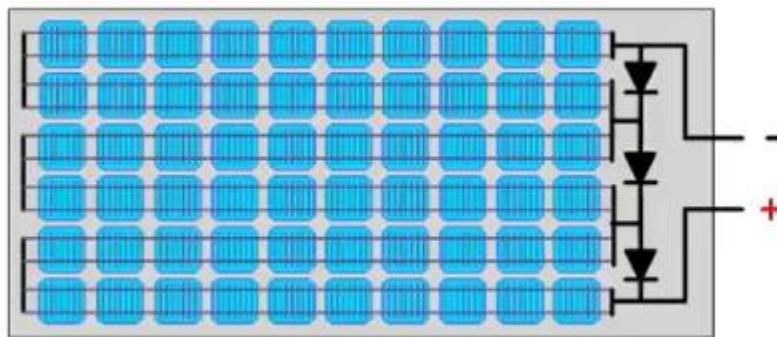
Cuando la conexión es en paralelo como se muestra en la Figura 7b) la tensión será la misma que la célula, pero la corriente del arreglo sería la suma de las corrientes de las

3 células, de forma generalizada la corriente del arreglo sería la suma de las corrientes de las células.

$$I_{pv} = \sum I_{cn}$$

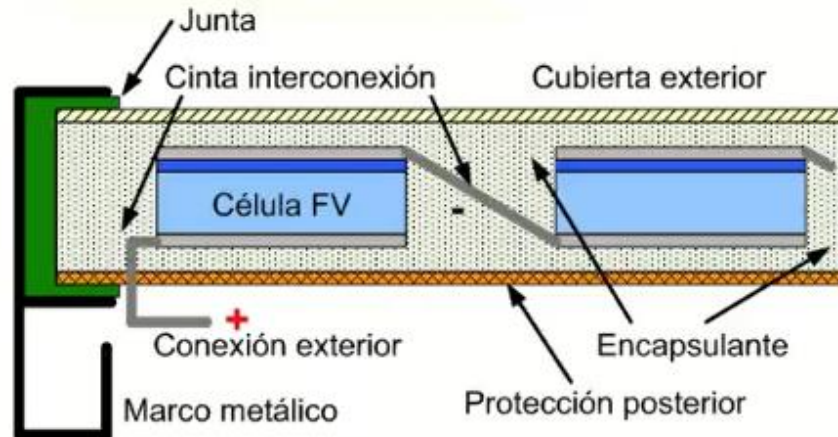
Debido a que las celdas tienen características similares, la corriente que genera cada una bajo los mismos niveles de irradiancia son similares por tanto simplemente se puede multiplicar el número de células conectadas en paralelo por la corriente de una célula, sin embargo, la conexión en paralelo de las células no es tan habitual debido a que la tensión de trabajo es muy baja y la corriente muy elevada.

$$I_{pv} = nI_c$$



*Figura 8. Conexión de células en serie para formar módulo fotovoltaico.*

La asociación de células fotovoltaicas en serie forma un módulo fotovoltaico como se puede ver en la Figura 8, el cual está formado por 60 células en serie en una matriz de 6x10, donde también se incluyen diodos de by-pass para proteger a las células fotovoltaicas frente a sombras parciales en el módulo. Durante sombreados parciales en el módulo las células con sombras se convierten en cargas y disipan energía que generan las demás células, en estas circunstancias la temperatura aumenta de forma considerable, formándose puntos calientes en el módulo. Si la temperatura sobrepasa el valor máximo de la célula los materiales encapsulantes se dañan de forma permanente y el módulo se daña. La función de los diodos de by-pass es limitar la potencia que puede llegar a soportar una célula sombreada y limita la potencia máxima a disipar en un valor que no provoque daños irreparables.



*Figura 9. Conexión entre células.*

En la Figura 9 se puede observar la conexión entre células en el interior del módulo fotovoltaico. El módulo consta de las células interconectadas dentro de un medio encapsulante para evitar que, entre la humedad, con una cubierta exterior y posterior, la conexión exterior en la caja de conexiones del módulo. También se le coloca un marco metálico para impedir que la humedad penetre en el módulo y para soporte al instalarlo.

### **1.3.7 Características del módulo fotovoltaico.**

Para hacer posible el manejo práctico, los fabricantes presentan las células asociadas eléctricamente entre sí y encapsuladas en un bloque llamado panel o módulo fotovoltaico como se observa en la Figura 10.

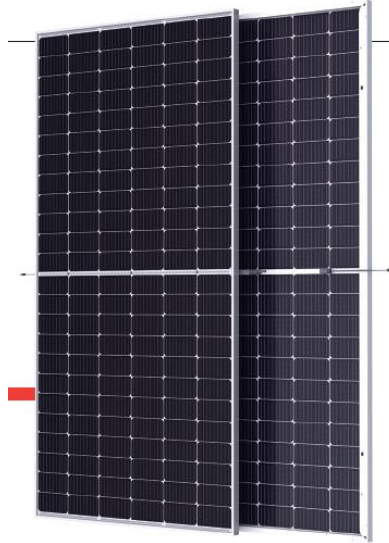


Figura 10. Módulo fotovoltaico bifacial DUOMAX Twin de 445W.

Datos del módulo. Los módulos fotovoltaicos constan de parámetros que se deben de tomar en cuenta para el diseño e implementación de instalaciones fotovoltaicas tanto aisladas como también conectadas a la red.

Condiciones STC. Las condiciones STC son las condiciones estándar de medidas por sus siglas en inglés. Las condiciones a las cuales son sometidas los paneles son bajo una irradiancia de  $1000 \text{ w/m}^2$ , una masa de aire de 1.5 AM por sus siglas en inglés y una temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . En estas condiciones se obtienen los parámetros del panel como la corriente de cortocircuito, la tensión de cortocircuito, la potencia máxima, corriente en el punto de máxima potencia y tensión en el punto de máxima potencia, los parámetros de panel bifacial DUIMAX Twin se presentan en las tablas siguientes.

Peak Power Watts- $P_{MAX}$ (Wp)*	430	435	440	445
Power Output Tolerance- $P_{MAX}$ (W)	0 ~ +5			
Maximum Power Voltage- $V_{MPP}$ (V)	40.5	40.8	41.1	41.4
Maximum Power Current- $I_{MPP}$ (A)	10.62	10.67	10.71	10.75
Open Circuit Voltage- $V_{oc}$ (V)	48.7	48.9	49.1	49.3
Short Circuit Current- $I_{sc}$ (A)	11.20	11.24	11.28	11.32
Module Efficiency $\eta_m$ (%)	19.5	19.7	19.9	20.2

STC: Irradiance  $1000 \text{ W/m}^2$ , Cell Temperature  $25^\circ\text{C}$ , Air Mass AM1.5.  
 \*Measuring tolerance:  $\pm 3\%$ .

Tabla 2. Datos eléctricos para la parte frontal del panel fotovoltaico bifacial DUOMAX TWIN bajo condiciones STC.

Maximum Power- $P_{MAX}$ (Wp)	457	479	500	522	544
Maximum Power Voltage- $V_{MPP}$ (V)	40.8	40.8	40.8	40.8	40.8
Maximum Power Current- $I_{MPP}$ (A)	11.20	11.74	12.27	12.80	13.34
Open Circuit Voltage- $V_{oc}$ (V)	49.0	49.1	49.2	49.3	49.4
Short Circuit Current- $I_{sc}$ (A)	11.80	12.36	12.93	13.49	14.05
Pmax gain	5%	10%	15%	20%	25%

Power Bifaciality:70±5%.

**Tabla 3. Datos eléctricos para la parte posterior del panel fotovoltaico bifacial DUOMAX TWIN bajo condiciones STC.**

Maximum Power- $P_{MAX}$ (Wp)	325	329	333	337
Maximum Power Voltage- $V_{MPP}$ (V)	38.2	38.5	38.8	39.0
Maximum Power Current- $I_{MPP}$ (A)	8.51	8.55	8.58	8.63
Open Circuit Voltage- $V_{oc}$ (V)	46.0	46.2	46.4	46.6
Short Circuit Current- $I_{sc}$ (A)	9.02	9.05	9.08	9.12

NMOT: Irradiance at 800W/m<sup>2</sup>, Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s.

**Tabla 4. Datos eléctricos del panel fotovoltaico bifacial DUOMAX TWIN bajo condiciones NMOT.**

Solar Cells	Monocrystalline
Cell Orientation	144 cells (6 × 24)
Module Dimensions	2111×1046×30 mm (83.11×41.18×1.18 inches)
Weight	28.6 kg (63.1 lb)
Front Glass	2.0 mm (0.08 inches), High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant material	POE/EVA
Back Glass	2.0 mm (0.08 inches), Heat Strengthened Glass (White Grid Glass)
Frame	30mm(1.18 inches) Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP 68 rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm <sup>2</sup> (0.006 inches <sup>2</sup> ), Portrait: 280/280 mm(11.02/11.02 inches) Landscape: 1900/1900 mm(74.80/74.80inches)
Connector	MC4 EVO2 / TS4*

**Tabla 5. Datos mecánicos del panel fotovoltaico bifacial DUOMAX TWIN de 445W.**

NMOT (Nominal Module Operating Temperature)	41°C (±3°C)
Temperature Coefficient of P <sub>MAX</sub>	- 0.35%/°C
Temperature Coefficient of V <sub>oc</sub>	- 0.25%/°C
Temperature Coefficient of I <sub>sc</sub>	0.04%/°C

*Tabla 6. Coeficientes de temperatura del del panel fotovoltaico bifacial DUOMAX TWIN de 445W.*

Operational Temperature	-40~+85°C
Maximum System Voltage	1500V DC (IEC) 1500V DC (UL)
Max Series Fuse Rating	20A

*Tabla 7. Rango de temperatura y valores máximo de tensión y corriente de operación del panel fotovoltaico bifacial DUOMAX TWIN de 445W.*

Intensidad de cortocircuito (I<sub>sc</sub>): Es la corriente que se obtiene cuando las terminales positivo y negativo del módulo se conectan, como se puede observar en

Tabla 2 para la parte frontal del panel DUOMAX de 445Wp la corriente I<sub>sc</sub> es de 11.32A y en la Tabla 3 para la cara posterior es de 11.80A.

Tensión de circuito abierto (V<sub>oc</sub>): Es la tensión que se obtiene cuando los terminales positivo y negativo no tienen ninguna carga conectada es decir se encuentran en estado de circuito abierto, por lo tanto, en estas condiciones se obtiene la tensión máxima del panel o módulo fotovoltaico.

Potencia máxima (P<sub>max</sub>) medida en vatios pico (Wp): es la potencia máxima que puede suministrar el panel, es el punto donde el producto de la intensidad y la tensión es máximo.

Corriente en el punto de máxima potencia (I<sub>mpp</sub>): es la corriente producida cuando la potencia es máxima.

Voltaje en el punto de máxima potencia (V<sub>mpp</sub>): es la tensión producida cuando la potencia es máxima.

Factor de forma. El factor de forma es un parámetro que se obtiene de la relación de la potencia máxima con respecto a la tensión de circuito abierto multiplicado por la corriente de cortocircuito.

$$FF = \frac{P_{MAX}}{V_{OC} * I_{SC}}$$

Eficiencia. Es el porcentaje de energía que se convierte en electricidad y se define como la relación de la potencia de salida del panel con respecto a la potencia de irradiación que incide sobre el panel.

$$\eta = \frac{W_p}{W_r}$$

Donde:

$W_p$ : Es la potencia generada por el panel fotovoltaico expresada en watts.

$W_r$ : Es la potencia de irradiación incidente en el panel expresada en watts.

Curvas I-V. Las curvas del comportamiento de la corriente y la tensión respecto a la cantidad de irradiancia que incide en el panel.

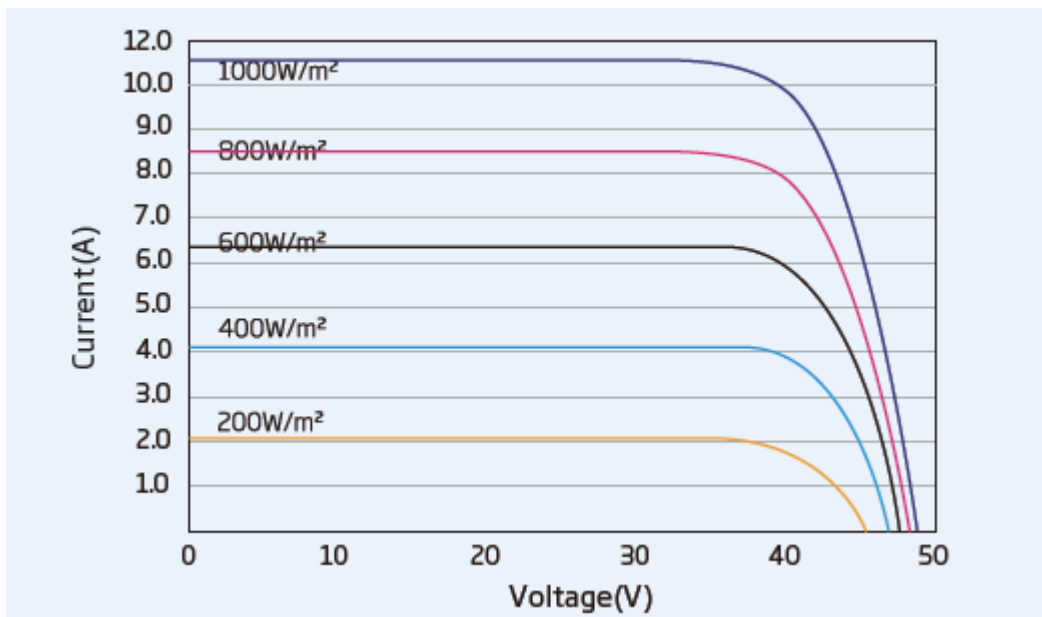


Figura 11. Curvas de I-V del panel fotovoltaico bifacial DUOMAX TWIN de 445W.

En la Figura 11 se puede observar que bajo diferentes niveles de irradiancia la corriente que suministra un panel es proporcional a la intensidad de la irradiancia y la superficie de células del panel, es decir la corriente es directamente proporcional a la irradiancia.

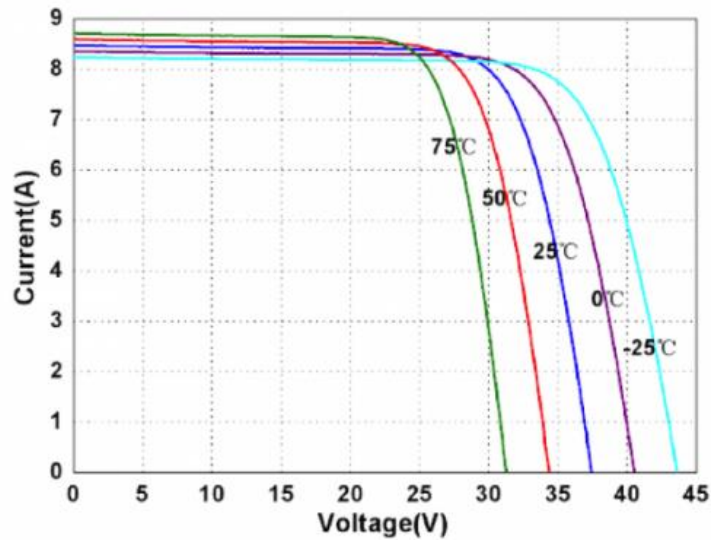


Figura 12. Variación de la tensión y la corriente bajo diferentes temperaturas.

Los paneles presentan unas pérdidas por aumento de la temperatura de operación, por norma general oscilan por cada 10°C de incremento en un 4% así la tensión proporcionada por un panel varía en función de la temperatura. A mayor temperatura menor tensión, como se observa en la Figura 12.

TONC: es la temperatura nominal de operación de la célula por sus siglas en inglés y se refiere a la temperatura que alcanzan las células cuando se les somete a una irradiancia de 800W/m<sup>2</sup> a una temperatura de 20°C, con una velocidad del viento de 1m/s y una masa de aire 1,5.

#### 1.4 Orientación e inclinación óptima de los paneles fotovoltaicos.

Para una instalación fotovoltaica es fundamental la elección de una orientación óptima para obtener la mayor cantidad de radiación durante el transcurso del día. Debido a que los paneles fotovoltaicos producen mayor energía cuando los rayos del sol inciden perpendicularmente sobre su superficie, por ello para una instalación que se va a realizar en el hemisferio norte los paneles se deben de orientar hacia el sur y si la instalación está en el hemisferio sur los paneles fotovoltaicos se deben orientar hacia el norte.

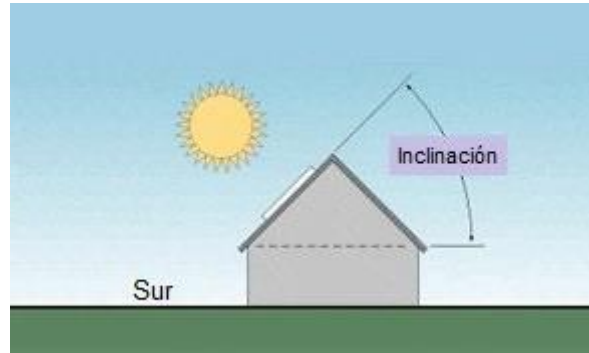
La forma de obtener la inclinación óptima es usando fórmulas, las cuales se basan en los análisis estadísticos de radiación solar anual en superficies con inclinaciones diferentes y ubicadas en diferentes latitudes, esta se expresa en grados y valor absoluto sin signo.

$$S_{opt} = 3.7 + 0.69|\varphi|$$

Donde.

$S_{opt}$  = Orientación óptima en grados.

$\varphi$  = Latitud del lugar expresada en grados.



*Figura 13. Orientación e inclinación de un sistema fotovoltaico.*

## Capítulo 2. Tipos de sistemas fotovoltaicos, capacidades de módulos bifaciales y elementos de instalación.

### 2.1 Operación de la instalación.

Cuando el Objetivo es utilizar la energía proveniente del sol en forma de electricidad, Los sistemas Fotovoltaicos son la opción, pero esto nos lleva a la pregunta: ¿cómo funciona el sistema fotovoltaico?

La respuesta a lo anterior se puede separar en tres partes, dependiendo del tipo de sistema fotovoltaico que se desee. Los tipos de sistemas Fotovoltaicos son:

#### 2.1.1 Sistema fotovoltaico conectado a la red.

Este tipo de sistema toma la energía eléctrica generada por el módulo fotovoltaico, la cual depende en intensidad y nivel de tensión mayormente de la construcción del mismo, que es corriente directa y pasa a ser corriente alterna por medio del inversor. Esta corriente alterna es producida lógicamente en las horas de mayor intensidad de la luz solar, y al carecer de un método de almacenaje el sistema, la instalación utilizará parte de la energía eléctrica generada y el excedente será inyectado de manera directa a la red eléctrica de la cual la instalación se alimenta. Justo como se muestra en la Figura 14.

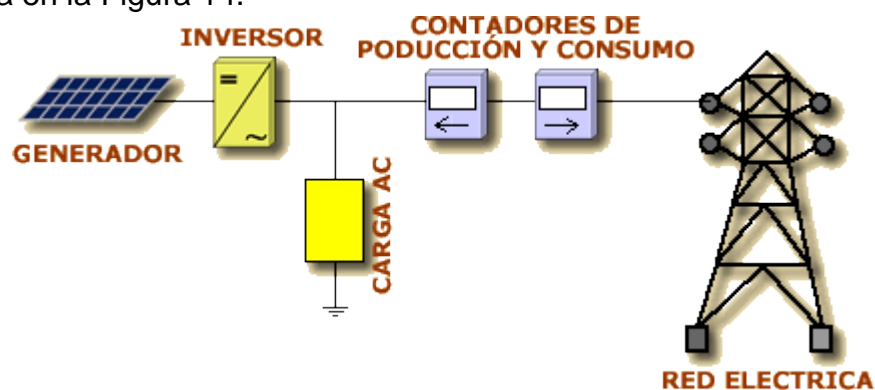


Figura 14. Sistema Conectado a la Red.

En este tipo de sistemas, así como durante las horas de mayor producción eléctrica, existe un excedente que se inyecta a la red, durante las horas nocturnas en las que no hay producción de electricidad la instalación tomara electricidad de la red, para

lo cual se debe instalar un contador bilateral de electricidad, contabilizando así la energía entregada a la red durante el día y la energía sustraída de la red en la noche. Por lo general en los países donde se puede instalar un contador eléctrico bilateral, las regulaciones de energía permiten la producción de electricidad por medio de sistemas fotovoltaicos de manera tal que no exceda el consumo de la instalación en la cual se ha colocado.

### 2.1.2 Sistema fotovoltaico aislado.

Como su nombre lo indica, este tipo de sistema carece de una conexión a alguna red eléctrica, por lo general son utilizados en campos donde no hay una red eléctrica cerca, o en sistemas de bombeo. En este sistema cuando se alimenta a una instalación eléctrica que necesita electricidad aun en las horas nocturnas, cuando no hay producción de electricidad por parte del módulo fotovoltaico, es indispensable utilizar un sistema de almacenamiento de energía. En los sistemas tipo isla o aislados una gran parte del costo se genera debido a la necesidad de utilización de baterías para poder almacenar energía.

En el sistema tipo isla, la energía es generada por el o los módulos fotovoltaicos esta es corriente directa, un dispositivo es el encargado de determinar que tanta energía está siendo utilizada en cada momento y en las horas de mayor producción solar, el excedente de energía es guardado aun en forma de corriente directa en la unidad de almacenamiento, en las horas nocturnas serán estas unidades de almacenamiento las que suministrarán la energía que en ellas se encuentra, para que la instalación siga operando. El tamaño de la unidad de almacenamiento será dimensionado en base a muchos parámetros, pero sujetos a la cantidad de energía requerida por la instalación. El esquema de este sistema se puede observar en la Figura 15.

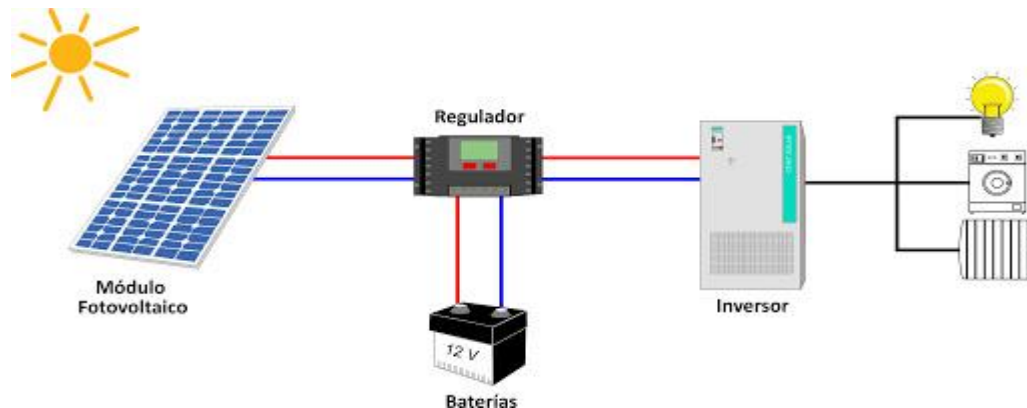


Figura 15. Sistema Fotovoltaico Aislado.

También es posible encontrar sistemas aislados sin unidad de almacenamiento, este tipo de sistemas se utiliza en estaciones de bombeo de agua, estos sistemas al carecer de almacenamiento solo operan durante las horas de sol, por lo cual es necesario calcular el consumo neto de agua diario, para poder dimensionar así este sistema.

### 2.1.3 Sistema fotovoltaico híbrido.

El tipo de sistema híbrido es el menos frecuente, esto debido a su costo, ya que los componentes necesarios para este tipo de sistema por lo general son más caros y como su nombre lo dice es la unión de los dos sistemas anteriormente mencionados, es un sistema que contiene una unidad de almacenamiento de energía para poder suministrar energía aun en las horas nocturnas y al mismo tiempo tiene una conexión a la red eléctrica para que en caso de que la unidad de almacenamiento se quede vacía, permite seguir operando la instalación a la que alimenta. Por ende, este tipo de sistema es el más confiable, y es utilizado en instalaciones eléctricas que así lo requieran. Un esquema de la conexión de un sistema híbrido se puede observar en la Figura 16.

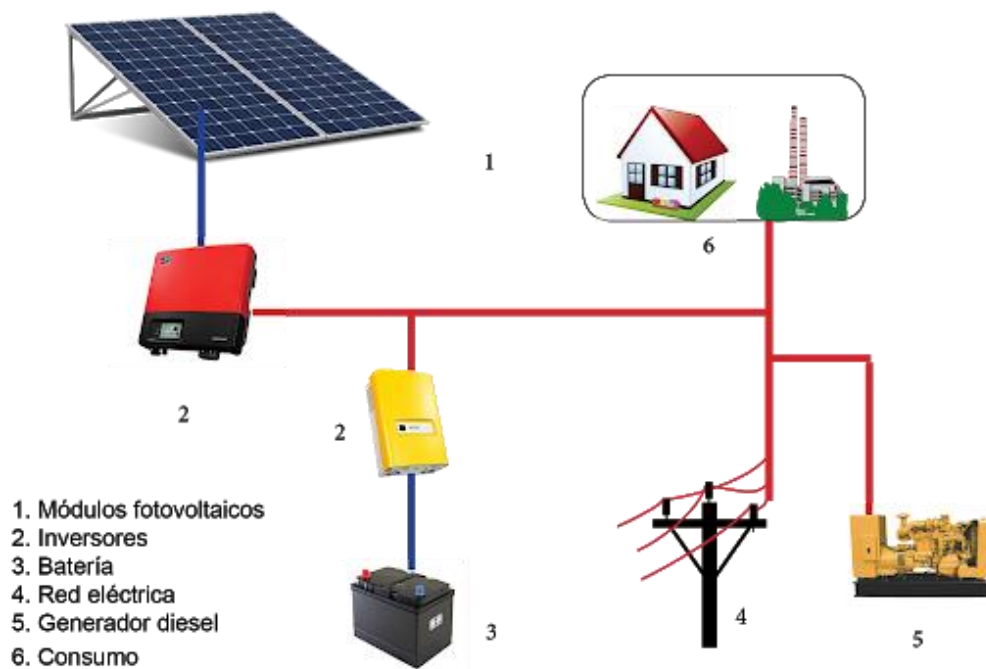


Figura 16. Sistema Fotovoltaico Híbrido.

### 2.2 Capacidades de los paneles bifaciales.

Muchos fabricantes de módulos fotovoltaicos ofrecen la tecnología bifacial con sus respectivas mejoras que día a día van investigando, poniendo en el mercado fotovoltaico módulos bifaciales con distintas capacidades de potencia.

Algunos de estos fabricantes y potencias de módulos fotovoltaicos disponibles son los siguientes.

<b>CAPACIDADES DE PANELES BIFACIALES</b>		
<b>FABRICANTE</b>	<b>BIFACIAL MONOCRISTALINO</b>	<b>BIFACIAL</b>
<b>Trina Solar</b>	385W 144 celdas	
	390W 144 celdas	
	395W 144 celdas	
	400W 144 celdas	
	405W 144 celdas	
	410W 144 celdas	
	475W 150 celdas	
	480W 150 celdas	
	485W 150 celdas	
	490W 150 celdas	
	495W 150 celdas	
	500W 150 celdas	
	505W 150 celdas	
	440W 144 celdas	
<b>Jinkosolar</b>	310W 120 celdas	335W 120 celdas
	315W 120 celdas	
	320W 120 celdas	
	325W 120 celdas	
	330W 120 celdas	
	335W 120 celdas	
	380W 144 celdas	
	385W 144 celdas	
	390W 144 celdas	
	395W 144 celdas	
	400W 144 celdas	
	410W 72 celdas	
	380W 72 celdas	
	385W 72 celdas	
	320W 60 celdas	
<b>Canadian solar</b>	305W 120 celdas	290W 120 celdas
	310W 120 celdas	295W 120 celdas
	315W 120 celdas	300W 120 celdas
	320W 120 celdas	305W 120 celdas
	370W 120 celdas	350W 144 celdas
	375W 144 celdas	355W 144 celdas
	380W 144 celdas	360W 144 celdas
	385W 144 celdas	365W 144 celdas
		400W 144 celdas

*Tabla 8. Fabricantes de paneles solares bifaciales y capacidades.*

Con el avance tecnológico y la constante búsqueda de una mayor eficiencia los fabricantes de módulos fotovoltaicos descubren y construyen más alternativas para la elección del módulo fotovoltaico que mejor se adapte a las necesidades y economía del cliente.

## **2.3 Elementos de la instalación.**

En la generación de energía fotovoltaica, es necesario usar equipos o elementos en los cuales cada uno cumple su función dentro de dicha generación, para poder producir, regular, transformar y acumular la energía.

Dentro de los elementos necesarios en este tipo de sistemas fotovoltaico están los siguientes:

### **2.3.1 Módulo fotovoltaico.**

Los módulos fotovoltaicos están compuestos de células capaces de convertir la energía radiada en energía eléctrica, estas células están unidas entre sí, de esta forma suma su potencia y así alcanza la potencia nominal del módulo. Esta potencia se mide en vatios-pico (Wp), la cual es la potencia que el módulo puede generar, cuando el módulo está sometido a la intensidad máxima es decir la intensidad que da el sol al medio día en un día despejado.

Para el caso de este trabajo, se utiliza el módulo bifacial el cual además de captar energía por su parte frontal también lo hace por la parte posterior del módulo.

### **2.3.2 Estructuras de sujeción de módulos.**

Esta estructura es la que nos permite mantener los módulos fotovoltaicos en una posición fija, garantizando la integridad de los módulos contra la acción del viento o movimientos sísmicos.

Existen estructuras móviles, que siguen el sol de oriente a poniente, tienen la ventaja de aumentar las horas de sol aprovechables por el módulo solar, pero también tienen sus desventajas, su costo es elevado y si bien es cierto que en verano la ganancia de energía es considerable, pero en invierno es poco significativa, como también requiere de mayor mantenimiento ya que tiene piezas móviles.

### **2.3.3 Regulador.**

Este equipo regula la carga y descarga de las baterías, reduce la intensidad de corrientes producida por los módulos fotovoltaicos en función del nivel de carga de las baterías, cuando la carga de las baterías está completa, el regulador las desconecta del sistema fotovoltaico, también puede desconectar el consumo de las baterías si detecta un nivel peligrosamente bajo.

### **2.3.4 Baterías.**

Las baterías son una solución bastante eficiente a la necesidad de acumular energía para su consumo, en las noches dado que los módulos fotovoltaicos no generan energía de noche, las baterías más económicas son las de plomo y entre ellas las más adecuadas para la aplicación fotovoltaicas son las de placa tubular. Se forman por elementos de 2 voltios, los que se conectan en serie, si se conectan 6 elementos se obtiene una corriente a 12 voltios.

Lo recomendable para las baterías es mantenerlas en un ambiente controlado, con temperaturas bajas, un exceso de calor se ha comprobado que reduce considerablemente la longevidad de las baterías.

### **2.3.5 Inversor**

La corriente generada por los módulos fotovoltaicos y la que acumulan las baterías es corriente continua, normalmente a voltajes bajos como 12V, 24V y 48V. Para poder utilizarlas en casas alimentadas por la red eléctrica convencional que utilizan corriente alterna a 110/120 V, se utiliza el inversor que convierte esta corriente continua (12, 24 y 48V) en corriente alterna (110/120V).

### **2.3.6 Aparatos de Protección.**

Los elementos de protección deben estar calculados para los circuitos de consumo, tanto para proteger los elementos como la batería y evitar así incendios provocados por cortocircuitos, así también para la protección de las personas, en caso de una descarga eléctrica se pueden usar interruptores diferenciales.

Se pueden usar fusibles en la parte de corriente continua e interruptores electromagnéticos en corriente alterna.

### **2.3.7 Contadores de energía.**

Los contadores registran la energía que pasa por un circuito determinado. Si se colocan entre el regulador y el consumo, medirán la energía consumida por el usuario en forma de corriente continua. Si se ubican entre los módulos fotovoltaicos y el regulador, medirán la energía que genera el campo fotovoltaico. Con estos aparatos se puede llegar a saber si el usuario dispone habitualmente de la energía precisa, si la tiene en exceso o si tiene menos de la que necesitaría. Con esa información se podrían recomendar acciones que mejoren las prestaciones de la instalación, que pueden ir desde aumentar el aprovechamiento de la capacidad de producción energética, a una ampliación de la potencia de los equipos de generación.

## Capítulo 3. Tecnologías fotovoltaicas y simulación de diseño bifacial en PVsyst.

### 3.1 Avances tecnológicos en módulos fotovoltaicos.

La tecnología ha tenido sus avances y en lo referente a módulos fotovoltaicos en lo que se puede destacar los siguientes:

#### 3.1.1 Paneles Multi Bus bar

Esas pequeñas cintas que conectan las celdas fotovoltaicas del panel son las llamadas bus bar. A través de ellas se transporta la corriente del módulo fotovoltaico como muestra la Figura 17.



*Figura 17. Cintas que conectan las celdas fotovoltaicas llamadas bus bar.*

Con el paso del tiempo, algunos fabricantes de módulos fotovoltaicos de primer nivel poco a poco han ido aumentando el número de bus bar en sus familias de paneles. Paneles con 4, 5 o más cantidad de bus bar se encuentran actualmente.

El principal beneficio del número de bus bar generalmente es recoger la mayor corriente que genera el panel, por tanto, a más cantidad de bus bar mejor recolección de la corriente que fluye a través de la celda. De esta forma, en caso de micro rotura proporcionan una ruta más corta y evita que exista una pérdida excesiva de rendimiento.

#### 3.1.2 PERC (Passivated Emitter Rear Cell)

La tecnología PERC se basa en un proceso que agrega una o más capas adicionales en la parte posterior de la célula solar para reflejar algunos de los fotones de luz que logran

pasar a través de la celda de vuelta hacia la celda, aumentando así la eficiencia total. Hoy en día la tecnología PERC en paneles monocristalinos se considera la gama más alta en muchos paneles [7]. En el contexto del mercado actual de fabricantes de celdas, ya se están ofreciendo paneles monoPERC a precios tan competitivos como los policristalinos.

Actualmente esta tecnología está registrando eficiencias récord de hasta 23.6%, tal como anunció hace poco el fabricante Longi Solar. Se predice que las células mono PERC se convertirán en el tipo de célula más popular y eficiente en los próximos años.

### 3.1.3 Paneles Half Cell

Otro tipo de paneles del que se ha escuchado en este último año son los paneles de doble celda o celda dividida, como se observa en la Figura 18. Lo que realmente se hace en este tipo de panel es dividirlo en 2 paneles más pequeños de 50% de capacidad cada uno. El principal beneficio de esta variante es el aumento del rendimiento debido a menores pérdidas de resistencia a través del bus bar. Como cada celda tiene la mitad de tamaño, produce la mitad de la corriente con el mismo voltaje, lo que significa que el ancho del bus bar se puede reducir a la mitad reduciendo el sombreado y las pérdidas de la celda.

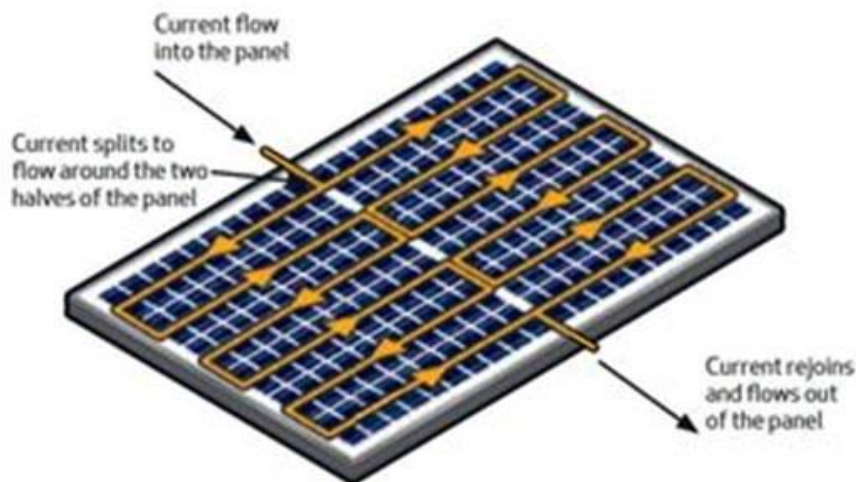


Figura 18. Panel Half Cell.

Así mismo, la menor distancia al centro del panel desde la parte superior e inferior mejora en general la eficiencia, y por ende puede aumentar la potencia de salida de un panel de tamaño similar hasta en 20W. Otra ventaja es que permite que el sombreado parcial en la parte superior o inferior del panel no afecte a toda la potencia de salida del panel.

### 3.1.4 Paneles Dual Glass

Estos paneles están formados por una lámina posterior de vidrio trasero que reemplaza a la tradicional lámina **EVA** (plástico) y crea un sándwich de vidrio y vidrio obteniendo un mejor panel ya que el vidrio no se deteriora con el tiempo o no sufre de degradación inducida por la luz (LID). Con esto se obtiene una mayor vida útil de los paneles de vidrio. Algunos fabricantes como Canadian Solar y Longi Solar ofrecen garantías de rendimiento de hasta **30 años** para este tipo de paneles como se muestra en la Figura 19.



*Figura 19. Paneles Longi con hasta 30 años de garantía.*

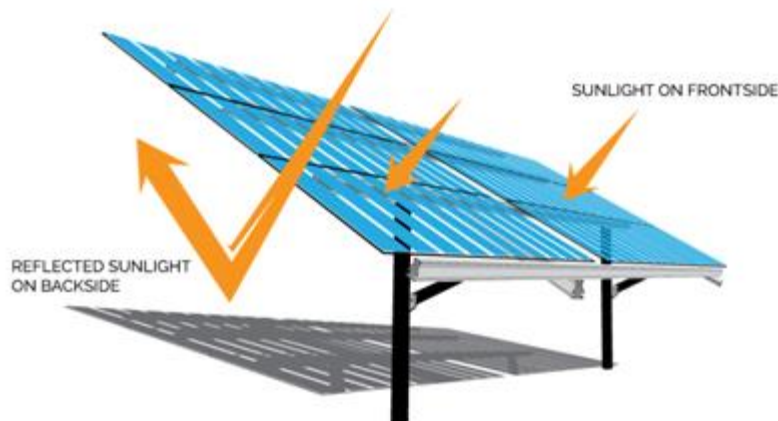
La mayoría de los paneles Dual Glass son sin marco, lo que puede complicar el montaje de los paneles ya que se requieren sistemas especiales de sujeción, aunque los módulos sin marco ofrecen varias ventajas, especialmente en lo que respecta a la limpieza. Cuando no existe marco es más difícil que el módulo atrape polvo y suciedad y cuando están inclinados o planos son mucho más fáciles de limpiar y están más dispuestos a ayudar a que el viento y la lluvia auto limpie, lo que resulta en una mayor producción solar.

### 3.1.5 Paneles Bi-faciales (doble cara)

Los módulos bifaciales producen energía solar desde ambos lados del panel. Mientras que los paneles tradicionales opacos de lámina posterior son monofaciales, los módulos bifaciales exponen tanto la parte frontal como la parte posterior de las celdas solares. Cuando los módulos bifaciales se instalan en una superficie altamente reflectante (como un techo de TPO blanco o en el suelo con piedras de colores claros), algunos fabricantes

de módulos bifaciales reclaman un aumento del 30% en la producción solo por la potencia adicional generada desde la parte posterior.

Los módulos bifaciales son fabricados en muchos diseños. Algunos están enmarcados, mientras que otros no tienen marcos. Algunos son de doble vidrio y otros usan hojas traseras transparentes. La mayoría utiliza células monocristalinas, pero hay diseños policristalinos. Hay módulos de doble vidrio sin marco que exponen la parte posterior de las celdas, pero no son bifaciales, los anteriormente mencionados los Dual glass. Los verdaderos módulos bifaciales tanto en la parte frontal como en la parte posterior de sus celdas reciben la energía del sol, en la que las potencias absorbidas por sus lados se suman para ser entregadas a su salida, los módulos bifaciales son fabricados para que tengan 2 terminales de salida ya que los contactos de su lado frontal como el trasero se unen internamente, lo que hace que se utilice menos componentes de conexión a como se utilizarían si tuviera 2 terminales de salida por cada cara del panel bifacial.



*Figura 20. Paneles bifaciales doble cara.*

### **3.1.6 Otros**

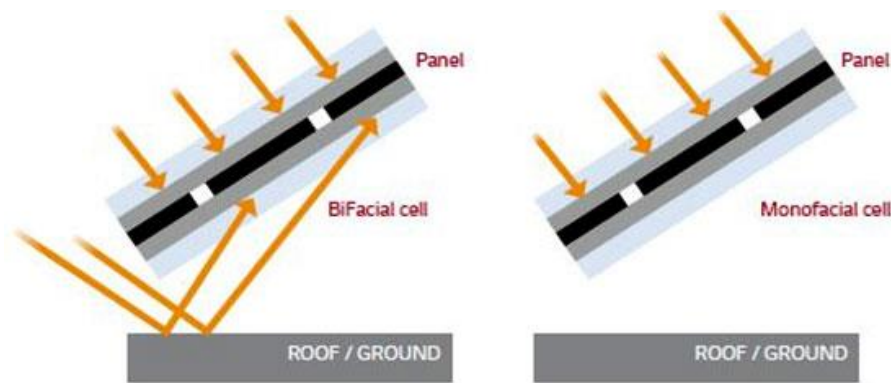
Existen también otro tipo de tecnologías, como las células de silicio IBC (Interdigitated Back Contact) e IBC de tipo N monocristalina. Si bien son la tecnología más eficiente y confiable del mundo, así como también mucho más resistentes que las células convencionales, estas tienen el inconveniente que son la tecnología más cara, aumentando el precio incluso en más de 1 USD/W que las tradicionales, en el futuro se espera que el tipo N sea más popular a medida que los costos de fabricación se reducen aún más y aumenta la eficiencia.

### 3.2 Diferentes tecnologías bifaciales.

Tecnologías de paneles que capturan energía de su lado frontal como del lado posterior, Conocidos estos paneles solares con el nombre de módulos bifaciales los cuales ya están disponibles en el mercado regular. Si bien esta tecnología lleva años disponibles, debido a que las células monocristalinas de alta calidad han ido disminuyendo su costo se han vuelto más populares.

Hay distintas variedades de estos paneles bifaciales en cuanto a celdas y silicio (Policristalino, Monocristalino), las células bi-faciales en las condiciones correctas pueden producir hasta un 25% o 30% más de producción en comparación a los paneles monofaciales (aquellos que solo captan radiación en una de sus caras) dicha eficiencia se verá reflejada en una mayor cantidad de energía obtenida por metro cuadrado instalado.

Estos paneles utilizan un sistema de vidrio delantero y trasero para encapsular las celdas, que es más duradero que la lámina posterior laminada de plástico tradicional utilizada en paneles regulares. El lado posterior de vidrio dura más tiempo con una menor degradación con el tiempo y puede reducir significativamente el riesgo de falla, con algunos fabricantes que ofrecen garantías de rendimiento de hasta 30 años en modelos de paneles bi-faciales.



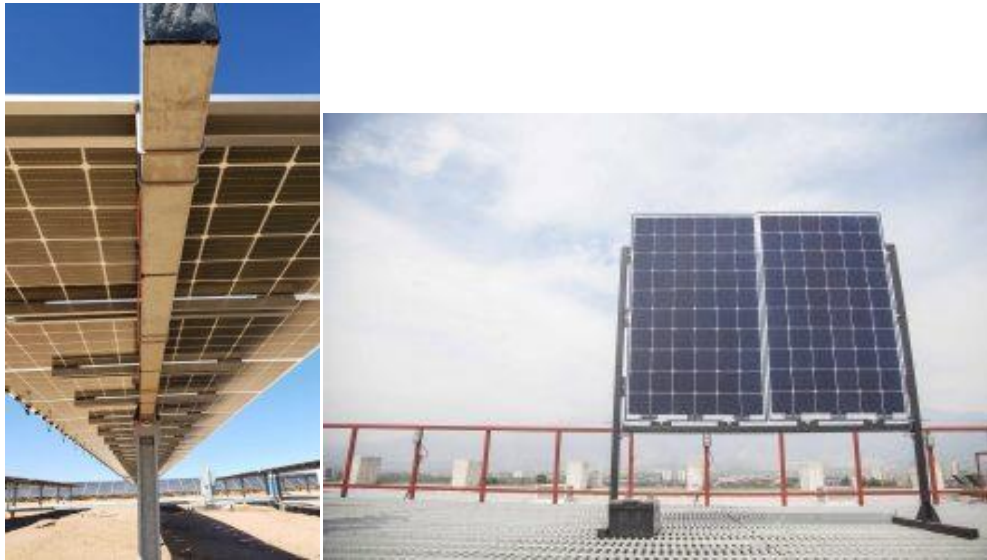
*Figura 21. Módulos fotovoltaicos bifaciales y monofaciales.*

Tenemos que tomar en cuenta que para aprovechar al máximo la bifacialidad estos módulos deben ser instalados en estructuras con ángulo, elevación y en suelos con reflectividad.

Los paneles solares bi-faciales tradicionalmente se instalan en pisos, en lugares donde la luz del sol se refleja fácilmente en las superficies circundantes, en particular regiones con presencia de nieve y latitudes extremas. Aunque se ha demostrado que también

funcionan bien cuando se instalan sobre superficies arenosas livianas, llegando a ser capaces de alcanzar hasta un 10% más de salida en tejados inclinados de color claro.

Algunos expertos señalan que esta tecnología será la tendencia en la implementación de las futuras centrales generadoras fotovoltaicas, debido a que puede generar hasta un 30% más de electricidad.



*Figura 22. Diferentes aplicaciones de los paneles fotovoltaicos.*

Entre las tecnologías que presenta la empresa JINKO SOLAR se tienen dos familias, los bifaciales de la familia Swan, en los que se encuentran los paneles bifaciales con doble vidrio y hoja posterior trasparente ambos con una potencia de 415W aproximadamente en su hoja frontal con eficiencia del 20.27%, así también de la familia Tiger tenemos el panel bifacial de hoja posterior trasparente de aproximadamente 470W, pero su parte frontal con una eficiencia del 20.65%.

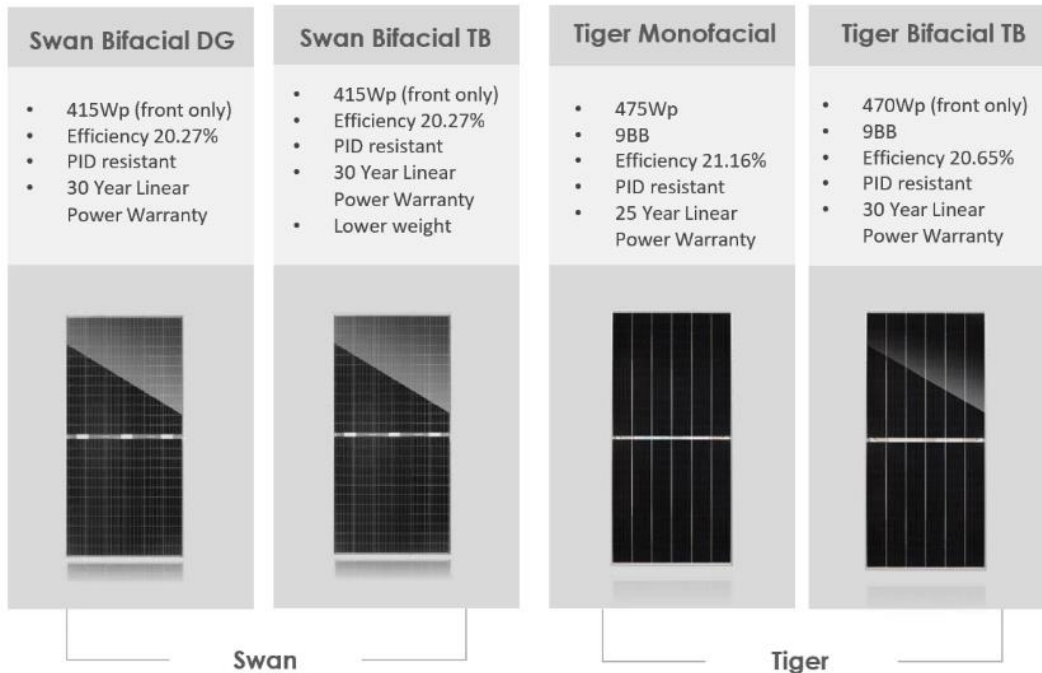


Figura 23. Diferentes tecnologías bifaciales.

En la tecnología de la familia Tiger se tiene que la característica principal es el cambio de bus bar 9, el cual permite una disminución de pérdidas por resistencia y efectos de microfractura, otra característica es la media celda, lo que permite un mejor rendimiento en lugares donde se pudiera producir sombras así si en medio panel hay sombra la otra mitad puede seguir produciendo, el TilingRibbon ayuda que haya una mayor potencia debido a que el espacio entre las celdas es más reducido. También se tiene el Circular Ribbon, esto hace que se reutilice la energía en lugar de reflejarla.

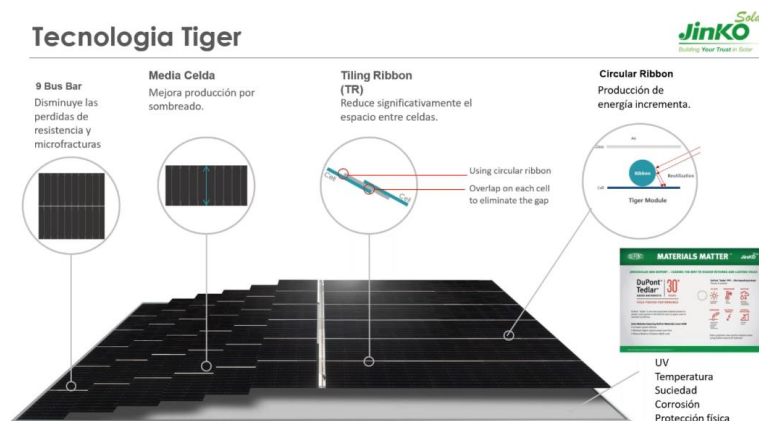


Figura 24. Tecnología tiger con cambio de bus bar 9.

### 3.2.1 Diferencias entre tecnologías de la familia Swan de panel, bifacial hoja posterior transparente y bifacial doble vidrio

Entre estas dos tecnologías de paneles bifaciales se observa según estudio realizado por empresa JINKO SOLAR que los paneles bifaciales de hoja posterior transparente tienen un menor peso, son más fáciles de limpiar, son mejores en generación de energía como también son mejores anti UV y ambientes corrosivos. Mientras que los paneles bifaciales de doble vidrio son mejores en climas calurosos, y tienen mejores propiedades mecánicas al viento.

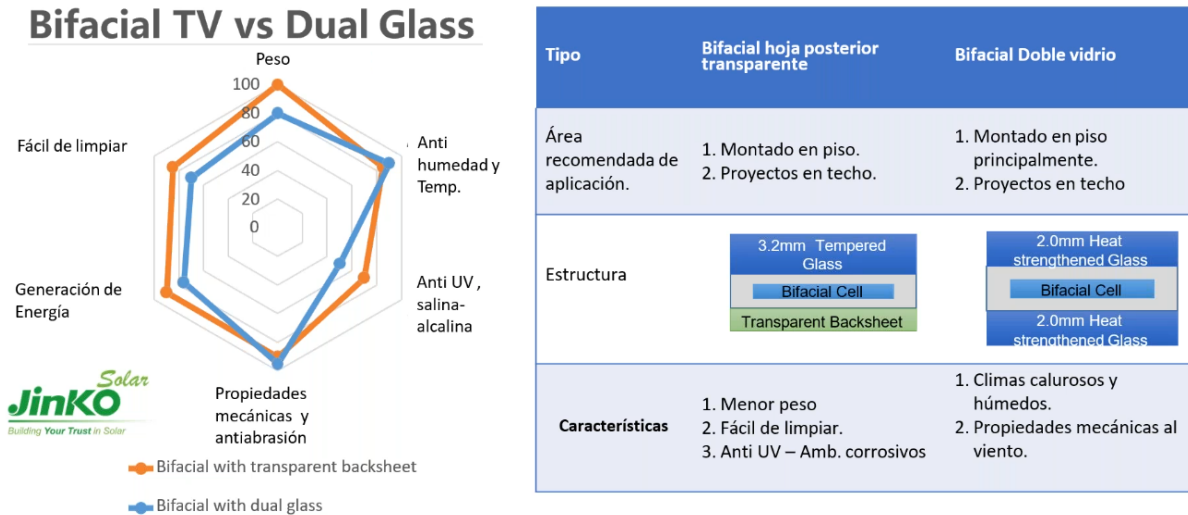
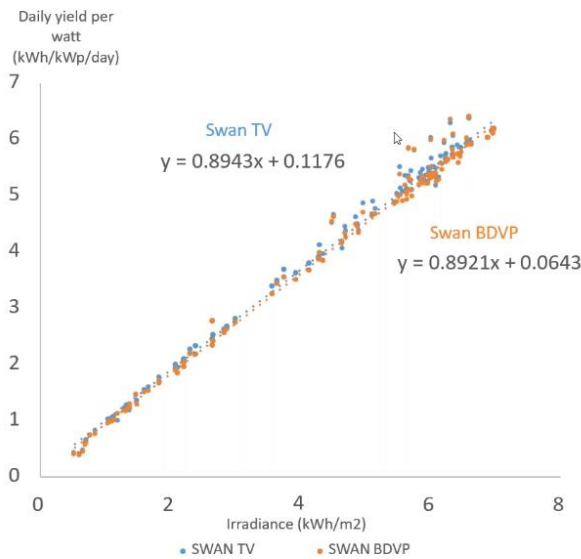


Figura 25. Paneles bifaciales de doble vidrio.

#### 3.2.1.1 Desempeño

En desempeño se podría decir que ambos tipos de paneles se comportan de la misma manera en baja irradiancia según datos de JINKO SOLAR, pero en cuanto a temperaturas con irradiancia más altas el sistema con hoja posterior transparente tiene un mejor desempeño esto debido a que posee una mejor operación de temperatura por la capacidad que tiene de disipar el calor.



1. La pendiente de rendimiento de la curva de irradiancia (igual a DC PR): Hoja posterior transparente > Doble vidrio
  - a. Baja irradiancia: Desempeño en diferentes condiciones de irradiación:
  - b. Alta irradiancia: Swan TV es un poco mejor que el Swan BDVP
  - c. **Alta irradiancia: Swan TV es mucho mejor que el Swan BDVP**



**SWAN TV tiene una menor temperature de operacion.**



Location: Haining, China  
Tilt: 30°  
Installation height: 0.7m  
Ground type: Cement  
Test period: 2019.8.2~2019.12.2

*Figura 26. Curva de desempeño de diferentes irradiancias.*

También otros fabricantes ofrecen la tecnología PERC Bifacial, la cual es una de las tecnologías de células de alta eficiencia más rentable la célula PERC en producción con pasivación trasera y ranurado láser y técnicas de metalización. Lo que mejora la eficiencia de conversión de las células. La eficiencia de conversión de célula PERC constantemente se ha ido actualizando y demostrando el fuerte potencial de PERC.

El fabricante de paneles chino TRINA SOLAR ha lanzado dos nuevos módulos solares bifaciales monocristalinos PERC. El Duomax V tiene una estructura de vidrio-vidrio, como también el Duomaxtwin doble vidrio que tiene las características siguientes:

- Modulo monocristalino 144 celdas.
- 2 terminales de salida.
- Rango de potencia 430-445W.
- Máxima eficiencia 20.2%.
- Tecnología de media celda.
- Multi Busbar (MBB).
- Resistente a la sal, el ácido y el amoníaco • Demostrada su confiabilidad en áreas de alta temperatura y humedad.



Figura 27. Modulo bifacial Duomax Twin.

### DATOS ELÉCTRICOS (STC)

Peak Power Watts- $P_{MAX}$ (Wp)*	430	435	440	445
Power Output Tolerance- $P_{MAX}$ (W)	0 ~ +5			
Maximum Power Voltage- $V_{MPP}$ (V)	40.5	40.8	41.1	41.4
Maximum Power Current- $I_{MPP}$ (A)	10.62	10.67	10.71	10.75
Open Circuit Voltage- $V_{OC}$ (V)	48.7	48.9	49.1	49.3
Short Circuit Current- $I_{SC}$ (A)	11.20	11.24	11.28	11.32
Module Efficiency $\eta_m$ (%)	19.5	19.7	19.9	20.2

STC: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5.  
 \*Measuring tolerance:  $\pm 3\%$ .

Figura 28. Datos eléctricos modulo bifacial Duomax Twin.

## CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS CON DIFERENTE GANANCIA DE POTENCIA EN EL LADO POSTERIOR (REFERENCIA A 435 WP EN EL FRENTE)

Maximum Power- $P_{MAX}$ (Wp)	457	479	500	522	544
Maximum Power Voltage- $V_{MPP}$ (V)	40.8	40.8	40.8	40.8	40.8
Maximum Power Current- $I_{MPP}$ (A)	11.20	11.74	12.27	12.80	13.34
Open Circuit Voltage- $V_{OC}$ (V)	49.0	49.1	49.2	49.3	49.4
Short Circuit Current- $I_{SC}$ (A)	11.80	12.36	12.93	13.49	14.05
Pmax gain	5%	10%	15%	20%	25%

Power Bifaciality:70±5%.

Figura 29. Características eléctricas del lado posterior del módulo bifacial Duomax Twin.

### CURVAS I-V DEL MÓDULO FV (435)

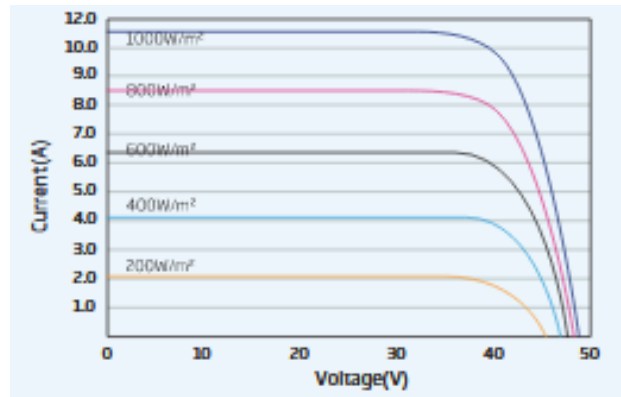


Figura 30. Modulo bifacial Duomax Twin.

### CURVAS P-V DEL MÓDULO FV (435W)

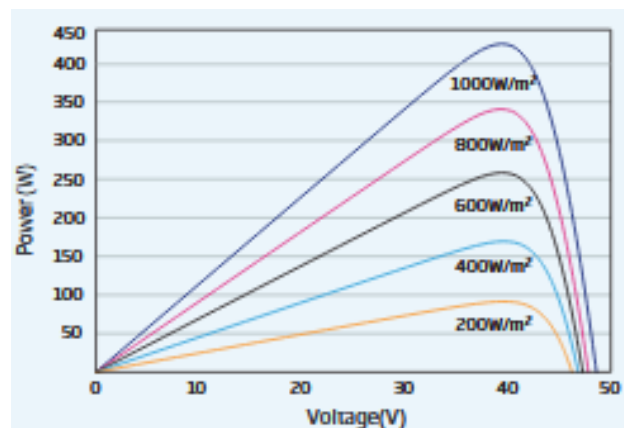


Figura 31. Modulo bifacial Duomax Twin.

En nuestro caso para este trabajo de graduación, usamos una adaptación del módulo solar monofacial del fabricante AMERISOLAR, el AS-6P30, de una potencia de 280W, con las características siguientes:

- Modulo policristalino 60 celdas.
- 2 terminales de salida.
- Rango de potencia 250-285W.
- Máxima eficiencia 17.52%.

Para obtener características similares de un módulo bifacial, se hizo uso de dos módulos solares monofaciales de características idénticas, los que se colocaron pegados con sus caras frontales una viendo al frente y el otro viendo a atrás, así se obtiene un equivalente a un módulo bifacial, para obtener los terminales de salidas equivalentes al de los módulos bifaciales se hace uso de una unión Y compatible con el conector MC4 en la que las terminales positiva se unen en paralelo y de la misma forma las terminales negativas, obteniéndose como resultado dos terminales de salida como se muestra en la Figura 32.



Figura 32. Conectores Y MC4, unión en paralelo de paneles monofaciales

CUADRO RESUMEN DE TECNOLOGIAS BIFACIALES.			
TECNOLOGIA	CARACTERISTICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Tiger hoja posterior transparente	Potencia de 470 Wp 9 Bus Bar Eficiencia 20.65% Media celda TilingRibbon Monocristalinos Estructura de hoja posterior transparente	Disminución de pérdidas por resistencia y efectos de microfractura, permite un mejor rendimiento en lugares donde se pudiera producir sombras, menor peso que las de doble vidrio.	Menos propiedades mecánicas al viento que las de doble vidrio, es menos eficiente que las de doble vidrio antivibración, como en climas caluroso.

Swan hoja posterior transparente	Potencia 415 Wp Eficiencia de 20.27% Resistentes a PID Media celda Monocristalinos Estructura de hoja posterior transparente	Menor peso que las de doble vidrio, más fáciles de limpiar, son mejores en generación de energía como también son mejores anti-UV y ambientes corrosivos, mejor desempeño con irradiación más alta.	Menos propiedades mecánicas al viento que las de doble vidrio, es menos eficiente que las de doble vidrio antivibración, como en climas caluroso.
Swan doble vidrio	Potencia 415 Wp Eficiencia de 20.27% Resistentes a PID Media celda. Monocristalinos Estructura de vidrio-vidrio	Mejores en climas calurosos y húmedos, tienen mejores propiedades mecánicas al viento.  Más eficientes en el envejecimiento por UV y corrosión de arena, ácido, álcali y niebla salina.	Más pesados que los de hoja posterior transparentes.  Menos fáciles de limpiar que los de hoja posterior transparentes.
DUOMAX Twin vidrio-vidrio	144 células PERC monocristalinas, doble vidrio, ganancia de energía adicional de 25%, potencia de 500 W, 430-445 w, Tecnología de barras múltiples, que puede acortar la distancia en más del 50%, por lo tanto, disminuir la resistencia de la cinta interna hasta en un 15%.	Baja emisión de carbono, mayor rendimiento, menos susceptibles a microgrietas, mayor protección contra la posible degradación inducida (PID) deformación del módulo, envejecimiento por UV y corrosión de arena, ácido, álcali y niebla salina. Mejores propiedades mecánicas al viento, bueno en climas calurosos.	Más pesados que los de hoja posterior transparentes.  Menos fáciles de limpiar que los de hoja posterior transparentes.
DUOMAX V	tiene una estructura de vidrio-vidrio, Celda PERC monocristalina potencia de salida 500Wp	Resistencia mecánica a vientos. Más eficientes en el envejecimiento por UV y corrosión de	Más pesados. Menos fáciles de limpiar que los de hoja posterior transparente

	eficiencia modular de hasta 21% monocristalino 150 celdas	arena, ácido, álcali y niebla salina.	
--	--	---------------------------------------	--

### 3.3 Factores importantes en la eficiencia de paneles fotovoltaicos.

Entre los factores más importantes para estimar la eficiencia de los módulos bifaciales tenemos:

- Factor bifacial (mayor factor bifacial, mayor ganancia bifacial)
- Geometría de la instalación (instalaciones más altas y menor factor de sombra a la cara posterior lleva a mayor ganancia bifacial)
- Albedo (mayor albedo (nivel de reflexión de la luz solar) mayor ganancia bifacial)
- Latitud (mayor latitud lleva a mayor luz difusa y mayor ganancia bifacial)

#### 3.3.1 Factor bifacial

El factor de bifacialidad es la relación de la eficiencia nominal en la parte posterior, con respecto con la eficiencia nominal de la parte frontal, recordando que la eficiencia nominal es simplemente la potencia nominal bajo STC y es expresada en KWp, y dividida por el área del módulo fotovoltaico en m<sup>2</sup>.

El factor bifacial (BF) en un panel fotovoltaico es una especificación de la base de datos, este factor nos indica el porcentaje en la parte posterior de la energía incidente, se puede utilizar para generar electricidad.

Los fabricantes de módulos bifaciales han logrado un factor bifacial de más o menos el 20%, esperando poder superarlo con el tiempo.

PVsyst (photovoltaic software) considera que el comportamiento de la producción de la parte posterior es similar al comportamiento de la parte frontal, es decir, obedeciendo al modelo de un diodo con los mismos parámetros.

Se hará un ejemplo utilizando el software de PVsyst en el cual se explicará paso a paso el proceso del diseño.

Paso 1. Se abre el programa PVsyst donde se observa el entorno del programa.

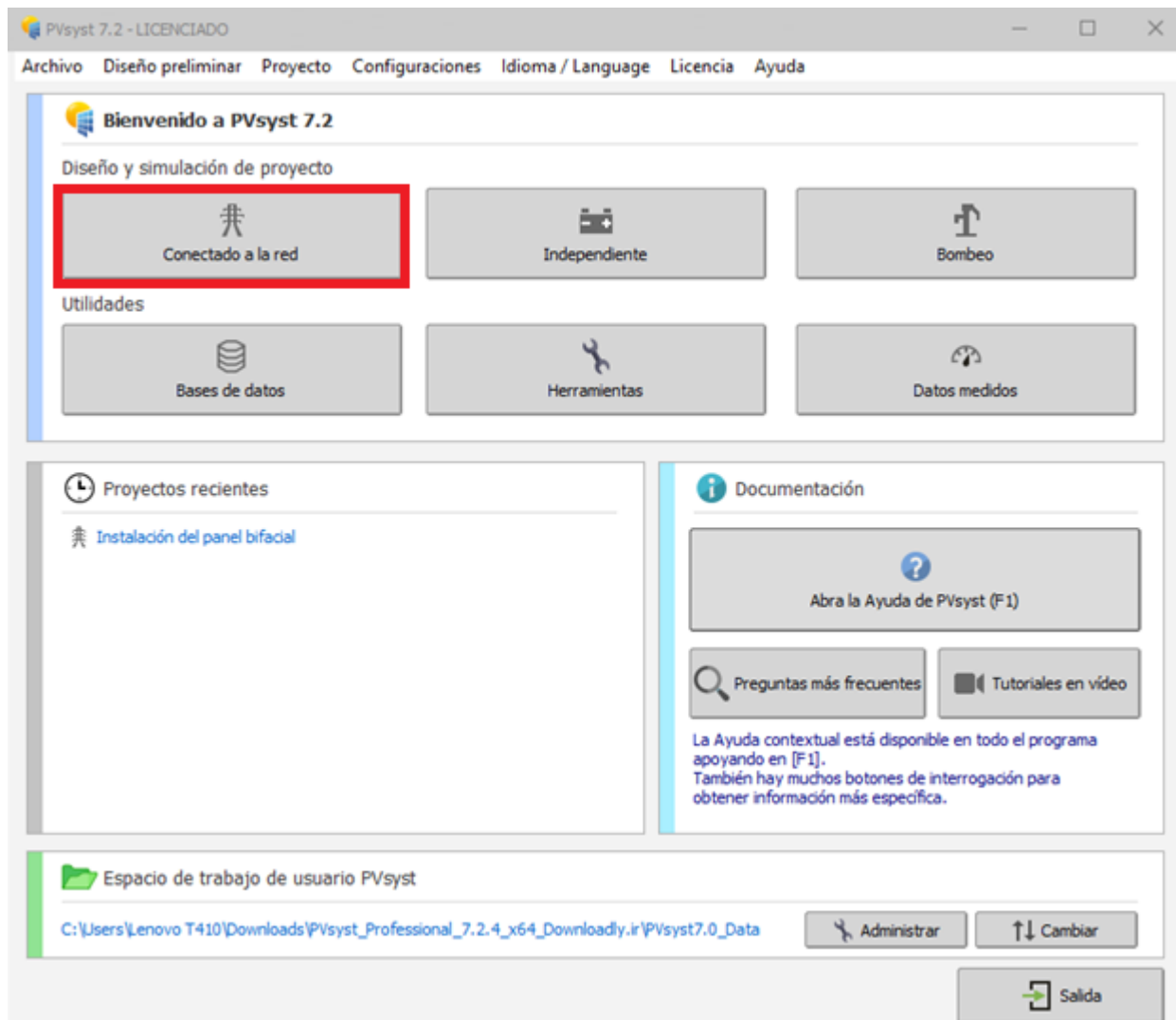


Figura 33. Entorno del programa PVsyst 7.2.

Como se puede observar en la Figura 33, en la ventana principal posee diferentes opciones, que son:

**Conectado a la red:** este sistema opera con presencia de red y un inversor con conexión a la red.

**Independiente:** este diseño se utiliza para sistemas autónomos, funciona aislado sin tener presencia de red, el inversor que se debe utilizar debe de ser aislado.

**Bombeo:** este diseño es basado para el bombeo, donde comúnmente el sistema funciona en horas de insolación debido a que la energía es consumida al momento de la producción.

El programa PVsyst también posee diversas utilidades las cuales son:

Base de datos. Donde se puede encontrar los diferentes elementos de la instalación, como; paneles, inversores, baterías, bombas y controladores de carga.

Herramientas. En esta parte posee diferentes tablas y gráficos para el estudio fotovoltaico.

Datos medidos. Acá se pueden observar los parámetros obtenidos de la simulación. Además, posee documentos de ayuda y videos para la correcta utilización del programa.

Para el diseño se selecciona la opción de un sistema fotovoltaico conectado a la red.

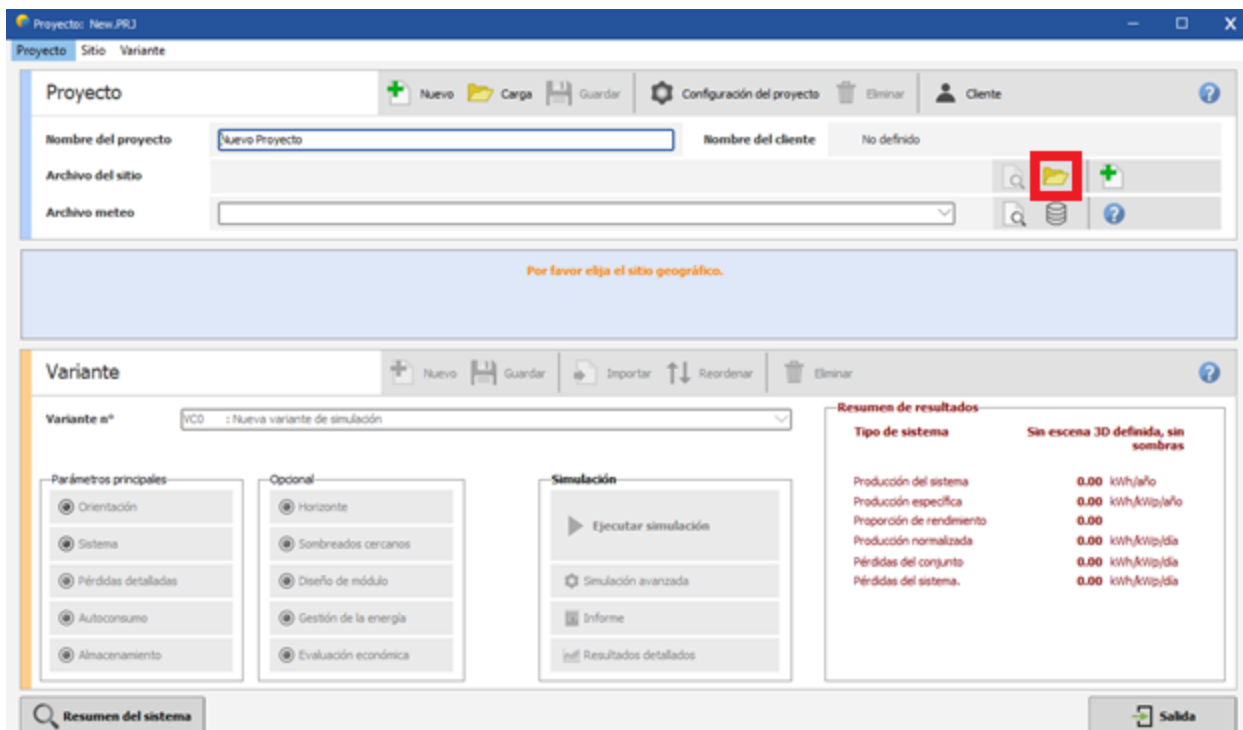



Figura 34. Entorno para los diferentes parámetros de la instalación fotovoltaica conectada a la red.

En la Figura 34 se puede ver los diferentes campos que son nombrar el proyecto, colocar el sitio de la instalación y además se deben colocar un archivo que contenga un registro de la irradiación del lugar y también de la opción de hacerlo manualmente, para mayor facilidad se pueden utilizar datos de la estación meteorológica como se observa en la Figura 36.

Para poder elegir el sitio de la instalación, en la opción “Archivo del sitio” se hace clic sobre el ícono  para poder ingresar el lugar geográfico de la instalación como se observa en la Figura 35. Además, también se puede seleccionar de forma gráfica el sitio por medio del mapa.

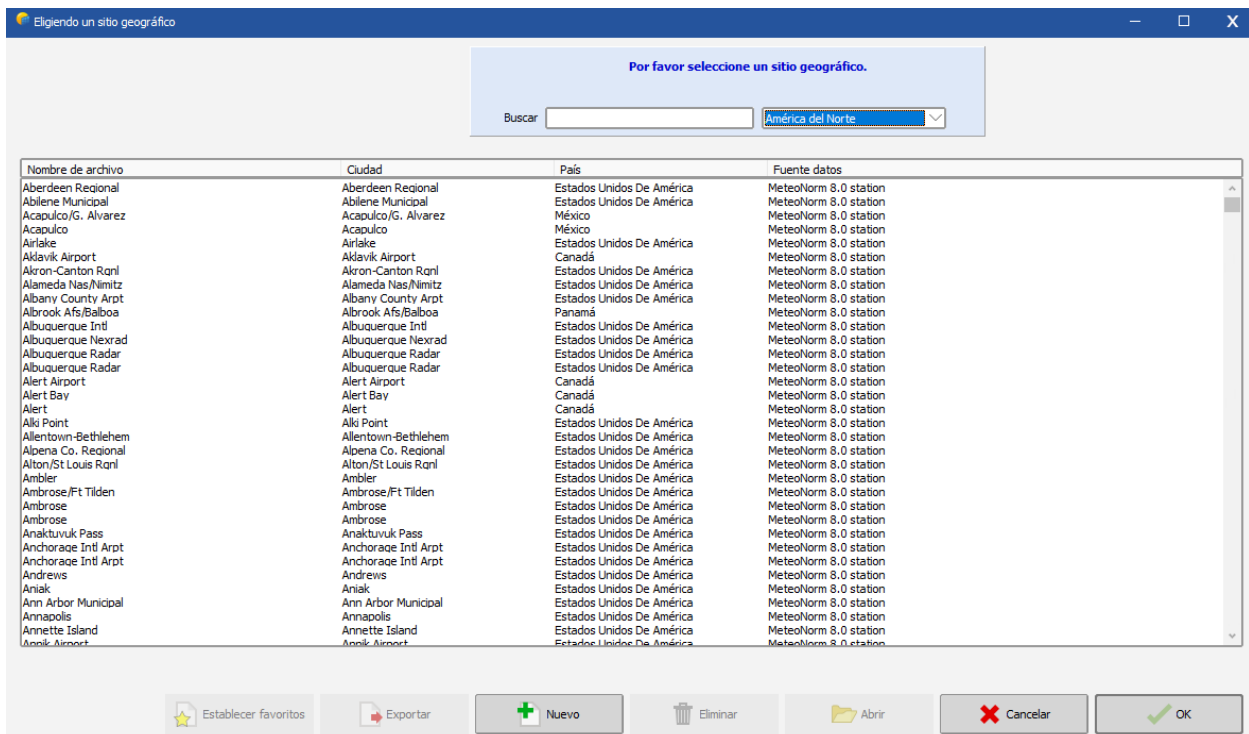


Figura 35. Ventana para agregar los datos meteorológicos del lugar de la instalación.

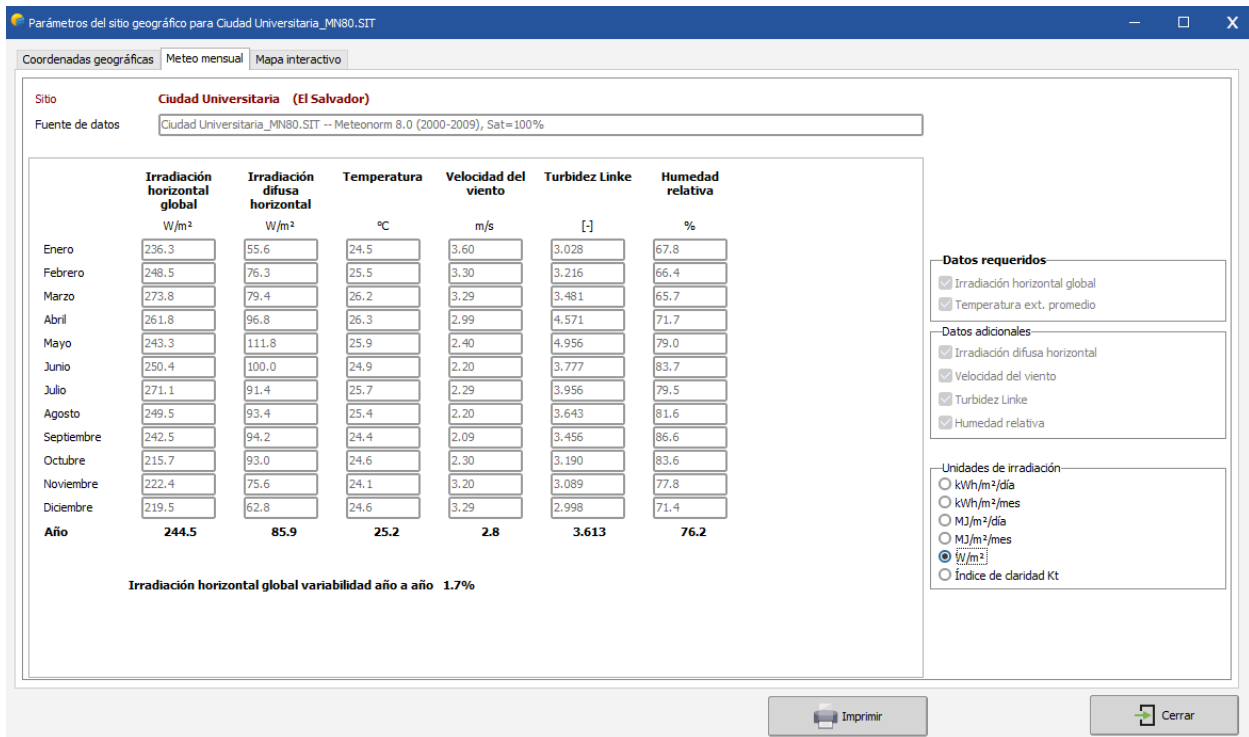


Figura 36. Ventana para agregar los datos meteorológicos del lugar de la instalación.

Por medio de los datos proporcionados, el programa proporciona un gráfico de recorridos del sol durante 1 año el cual se puede observar en el Gráfico 1.

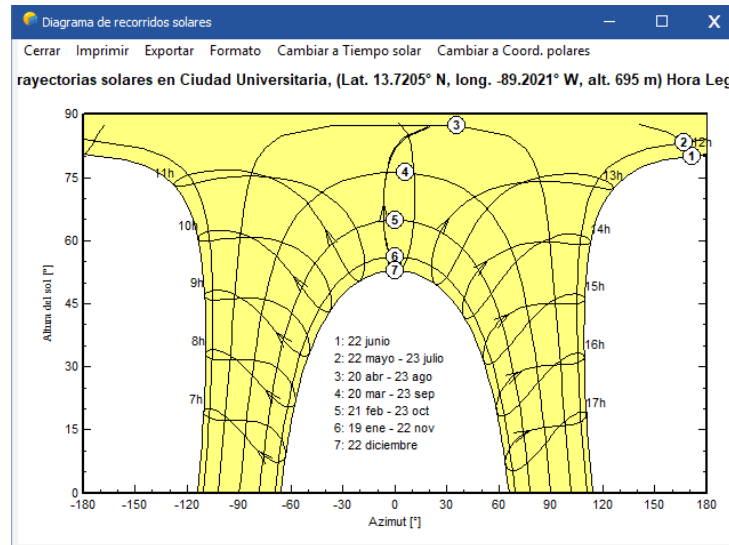


Gráfico 1. Recorrido del sol durante un año para el lugar definido.

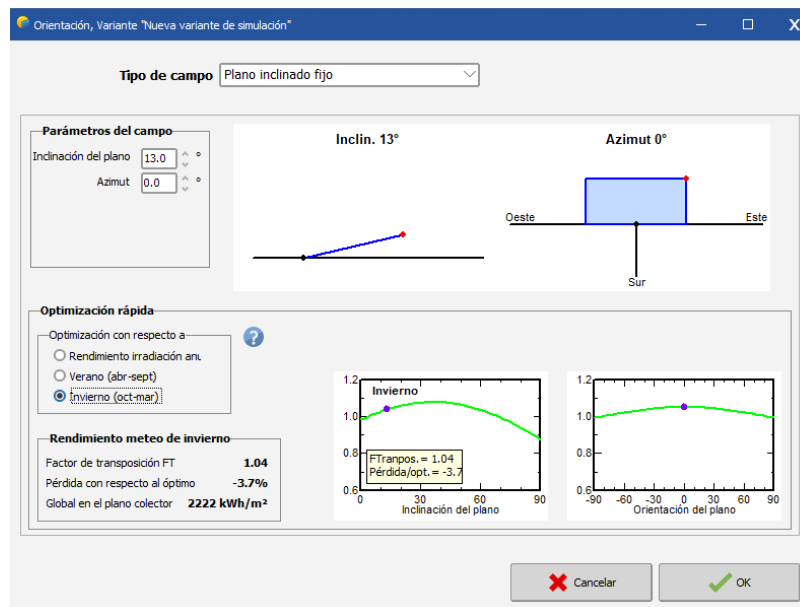


Figura 37. Configuración de la orientación óptima de los paneles fotovoltaicos.

Para poder configurar la orientación e inclinación de los módulos fotovoltaicos, se hace clic en el apartado orientación y aparece la ventana que se muestra en la Figura 37, acá en la parte de Inclinación del plano ponemos  $13^{\circ}$  la cual es la inclinación óptima, luego como el sistema fotovoltaico estará orientada al sur, donde dice Azimut ahí se coloca  $0^{\circ}$ .

También se proporciona diferentes gráficas y se optimiza la orientación en diferentes condiciones.

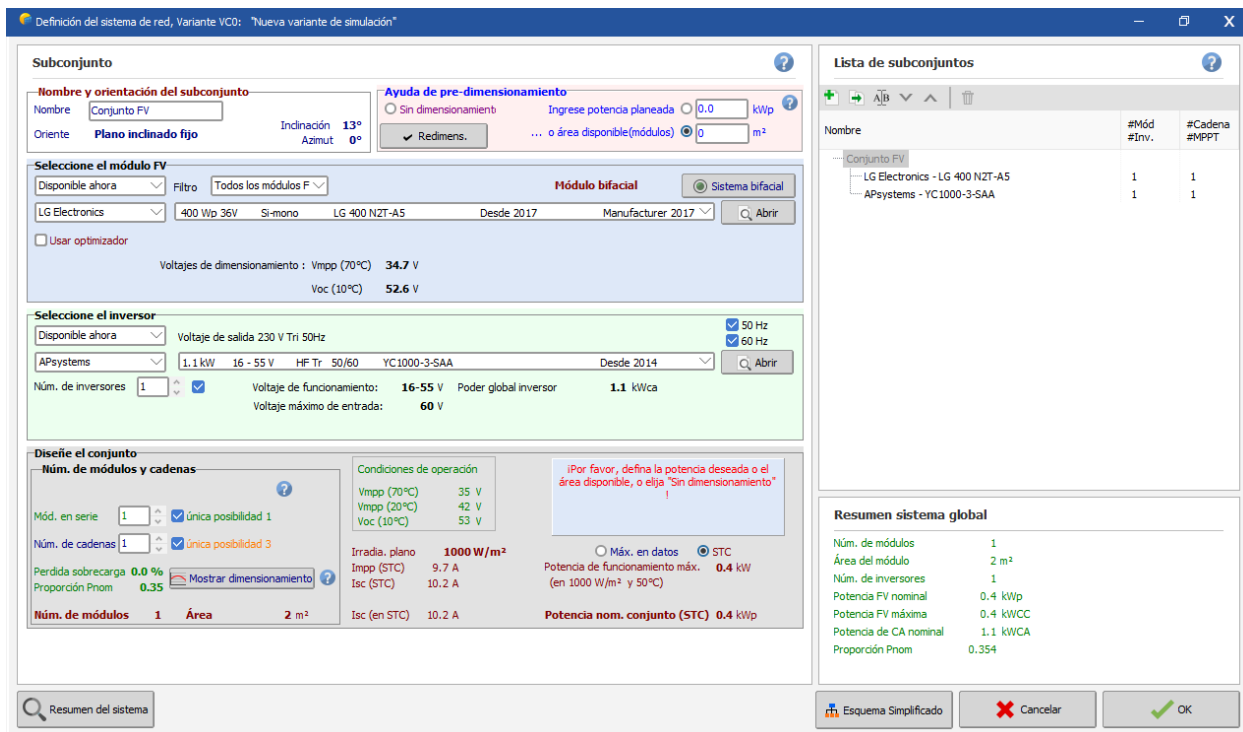


Figura 38. Selección del módulo fotovoltaico y el inversor para la simulación.

Se procede al dimensionamiento del sistema fotovoltaico seleccionando los paneles fotovoltaicos y el inversor adecuado para su correcto funcionamiento. Para ello se hace clic en el apartado sistema y aparece la ventana de la Figura 38. Para diseñar con módulos bifaciales se debe elegir la opción de sistema bifacial. El módulo que se elige es el LG 400 N2T-AS, para poder observar sus parámetros eléctricos y mecánicos se hace clic en la pestaña abrir, y se muestra la ventana de la figura , donde se pueden apreciar los diferentes valores, como; Pnominal, Isc, Impp, Voc y Vmpp bajo condiciones STC.

Las medidas del panel se pueden observar en la

Figura 40, además proporciona el número de células que se encuentran en paralelo y en serie en el módulo con el área de la célula.

Para elegir el inversor se debe tomar en cuenta la potencia del inversor, la tensión máxima y la tensión de trabajo para que PVsyst pueda ejecutar la simulación. Posteriormente se selecciona el inversor YC-1000-3-SA, las características se observan en la Figura 38, una vez se ha dimensionado el sistema se puede seleccionar la pestaña de pérdidas para poder colocar los parámetros que se observan en la Figura 45, también se puede observar la distribución normal de la producción de la instalación como se observa en la

Figura 46, luego se parametriza el factor económico para poder desarrollar la instalación cuantificando los costos, llenando las casillas que se observan en la Figura 47, por último

se corre el programa obteniendo los resultados de la Figura 48, donde también se puede generar un reporte en pdf de todos los datos obtenidos (ver anexos).

The screenshot shows the 'Definición de un módulo FV' software interface. The 'Datos básicos' tab is active, displaying the following information:

- Modelo:** LG 400 N2T-A5
- Fabricante:** LG Electronics
- Nombre de archivo:** LGElectronics\_LG400\_N2T\_A5.PAN
- Fuente datos:** Manufacturer 2017
- Base de datos:** PVSyst original
- Prod. desde:** 2017

**Potencia nom. (en STC):** 400.0 Wp. Tolerancia: +/- 0.0 / 3.0 %.

**Tecnología:** Si-mono

**Especificaciones del fabricante o otras medidas:**

Condiciones de referencia	GRef	1000	W/m <sup>2</sup>	TRef	25	°C
Corriente de cortocircuito	Isc	10.230	A	Circuito abierto Voc	50.50	V
Punto de Potencia máx.	Imp	9.490	A	Vmpp	42.20	V
Coeficiente de temperatura	muIsc	3.1	mA/°C	<b>Núm. de células</b>	<b>72 en series</b>	
	o muIsc	0.030	%/°C			

**Herramienta de resultado del modelo interno:**

Condiciones de operación	GOper	1000	W/m <sup>2</sup>	TOper	25	°C
Punto de Potencia máx.	Pmpp	402.3	W	Coef. temper.	-0.36	%/°C
	Corriente Imp	9.74	A	Voltaje Vmpp	41.3	V
Corriente de cortocircuito	Isc	10.23	A	Circuito abierto Voc	50.5	V
Eficiencia	/ Área células	21.63	%	/ Área módulo	19.03	%

**Resumen del modelo:**

**Parámetros principales:**

- Derivación R: 1500 Ω
- Rderiv(G=0): 3500 Ω
- Modelo serie R: 0.35 Ω
- Serie R máx.: 0.36 Ω
- Serie R aparente: 0.53 Ω

**Parámetros del modelo:**

- Gamma: 1.021
- IoRef: 0.02 nA
- muVoc: -142 mV/°C
- muPMax fijo: -0.36 /°C

Buttons at the bottom: Mostrar optimización, Copiar a la tabla, Imprimir, Cancelar, OK.

Figura 39. Parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico

Definición de un módulo FV

Datos básicos | **Tamaños y tecnología** | Parámetros del modelo | Datos adicionales | Comercial | Gráficos

Descripción **LG Electronics, LG 400 N2T-A5**

**Módulo**

Longitud: 2064 mm  
 Anchura: 1024 mm  
 Espesor: 40.0 mm  
 Peso: 22.00 kg  
 Área módulo: 2.114 m<sup>2</sup>

**Células**

En series: 72  
 En paralelo: 1  
 Área celular: 258.3 cm<sup>2</sup>  
 Núm. total células: 72  
 Área células: 1.86 m<sup>2</sup>

La definición del tamaño del Módulo es obligatoria: se utiliza para la determinación de la eficiencia "usual"  
 El área de células es facultativa: si se define, permite la definición de la eficiencia a nivel celular.

**Tecnología y especificidad del módulo**

Marco: Anodized Aluminum  
 Estructura: Glass / EVA  
 Conexiones: Cable, MC4 connector  
 Bifacial module

**Voltaje máximo del conjunto**

Voltaje absoluto máximo del conjunto en cualquier condición (es decir, Voc a la temperatura ambiente más baja posible).  
 Voltaje máximo IEC: 1000 V  
 Voltaje máximo UL (US): 1500 V

**Diodos de protección de derivación**

Núm. de submódulos: 3 /módulo (es decir, diodos de derivación funcionales)

Partición submódulo:

En longitud  Medias células gemelas  
 De ancho  Células de tejas  
 Otro

Módulo teja  
 CFV : módulo de concentración  
 **Módulo bifacial**

**Módulo bifacial**

Factor de bifacialidad: 0.800    
 Proporción entre la eficiencia nominal delantera y la eficiencia del lado posterior en STC

Mostrar optimización | Copiar a la tabla | Imprimir | Cancelar | OK

Figura 40. Tamaños del módulo fotovoltaico bifacial.

Definición del inversor de red

Parámetros principales | Curva de eficiencia | Parámetros adicionales | Parámetros de salida | **Tamaños y tecnología** | Datos comerciales

Modelo: YC1000-3-SAA | Fabricante: APsystems  
 Nombre de archivo: APS\_YC1000\_3\_EU\_SAA.OND | Fuente de datos: Manufacturer 2015  
 Base de datos PVsyst original | Prod. desde 2014

**Lado de entrada (Campo FV CC)**

Voltaje MPP mínimo: 16 V  
 Voltaje mín. para PNom: N/A V  
 Corriente de entrada máxima: N/A A  
 Voltaje MPP nominal: N/A V  
 Voltaje MPP máximo: 55 V  
 Voltaje FV máx. absoluto: 60 V  
 Umbral de potencia: 5.59 W   Defecto

Especificación contractual, sin significado físico verdadero:  Requerido

Potencia FV nominal: 1.50 kW  
 Potencia FV máxima: N/A kW   
 Corriente FV máxima: N/A A

**Lado de salida (Red CA)**

Frecuencia:  50 Hz  60 Hz  
 Monofásico  Trifásico  Bifásico

Voltaje de red: 230 V  
 Potencia de CA nominal: 1.13 kW  
 Potencia CA máxima: 1.13 kW  
 Corriente CA nominal: 1.63 A   
 Corriente CA máxima: N/A A

**Eficiencia**

Eficiencia máxima: 95.30%   
 Eficiencia definida para 3 voltajes

Copiar a la tabla | Imprimir | Cancelar | OK

Figura 41. Parámetros eléctricos del inversor.

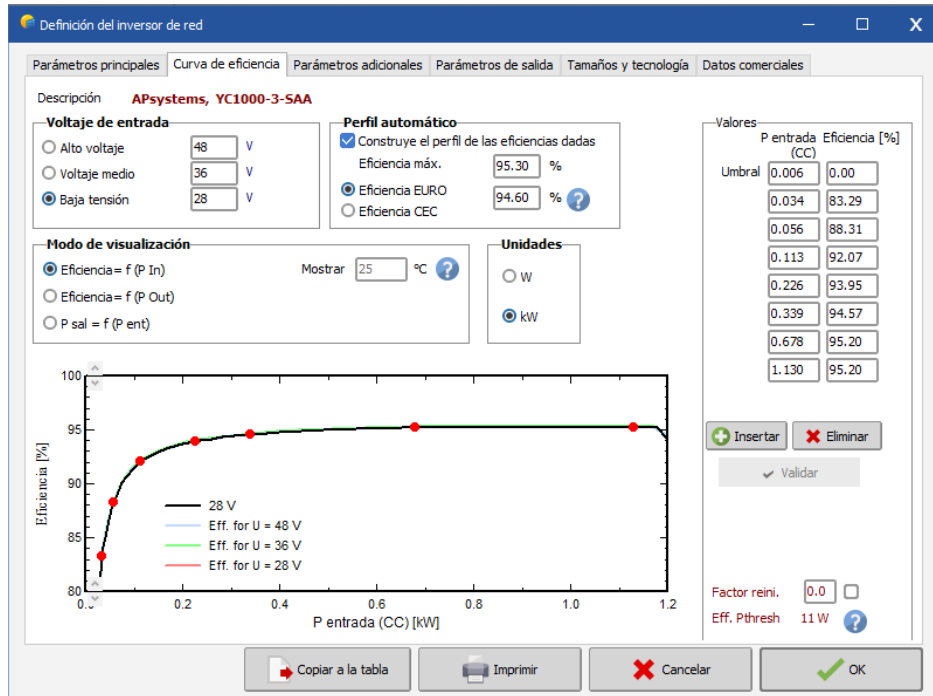


Figura 42. Curva de eficiencia del inversor.

**Parámetros detallados de pérdidas del campo FV**

Envejecimiento | Indisponibilidad | Corrección espectral

Parámetro térmico | Pérdidas óhmicas | Calidad del módulo - LID - Desajuste | Pérdida de suciedad | Pérdidas IAM | Auxiliares

Puede definir el factor de pérdida térmica de campo o el coeficiente TNCO estándar: ¡el programa da la equivalencia!

**Factor de pérdidas térmicas del campo**

Factor de pérdida térmica:  $U = U_c + U_v * \text{Vel. viento}$

Factor de pérdida constante  $U_c$ : 29.0 W/m<sup>2</sup>K

Factor de pérdida del viento  $U_v$ : 0.0 W/m<sup>2</sup>K m/s

**Valor predeterminado según montaje**

- Módulos montados "libres" con circulación de aire
- Semi-integrado con conducto de aire detrás
- Integración con respaldo totalmente aislado

**Factor TNCO estándar**

Definición alternativa:

Coefficiente TNCO: 45 °C

para "Nominal Operating Cell Temperature"  
Temperatura de los módulos montados "libres"  
en circuito abierto, debajo G=800 W/m<sup>2</sup>,  
Tamb=20° C, Viento=1m/s.

**Definición de la TNCO**

- Circuito abierto (en Vc)
- Cargado (en Pmpo)

Botones: Gráfico de pérdidas, Cancelar, OK

Figura 43. Definición de las pérdidas de la instalación.

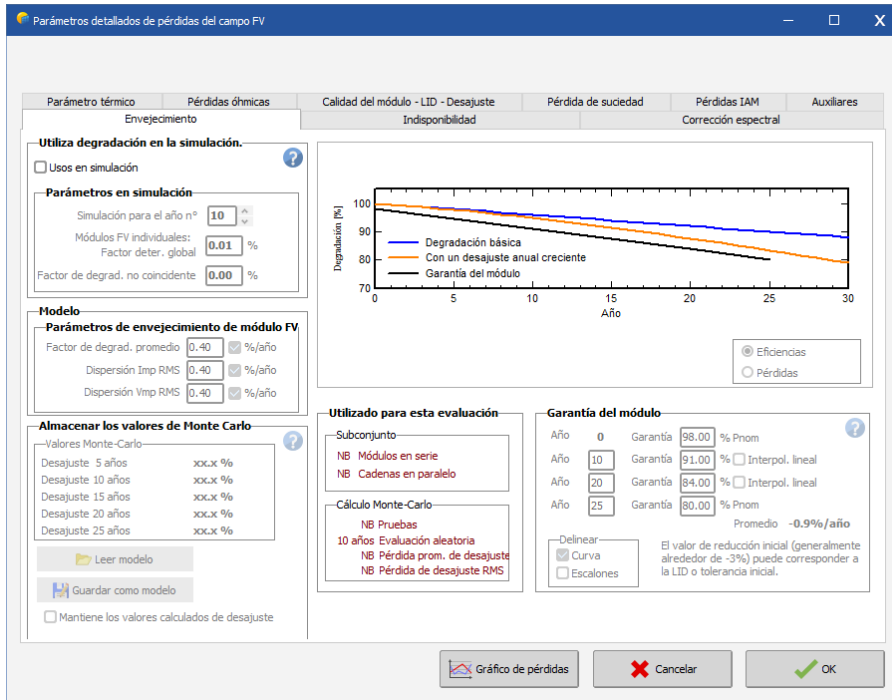


Figura 44. Curva de pérdidas de la instalación.

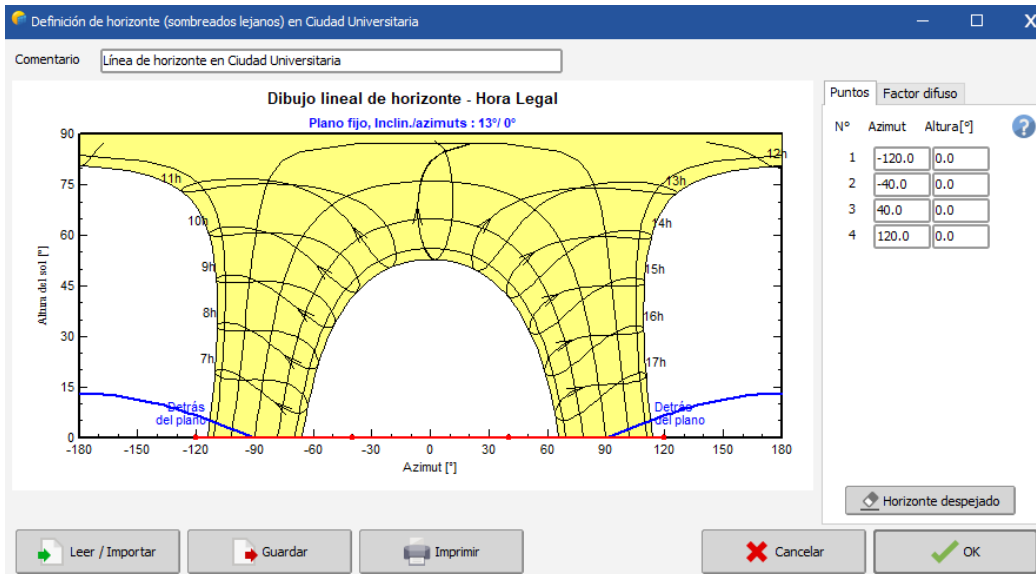


Figura 45. Pérdidas detrás del plano de la instalación.

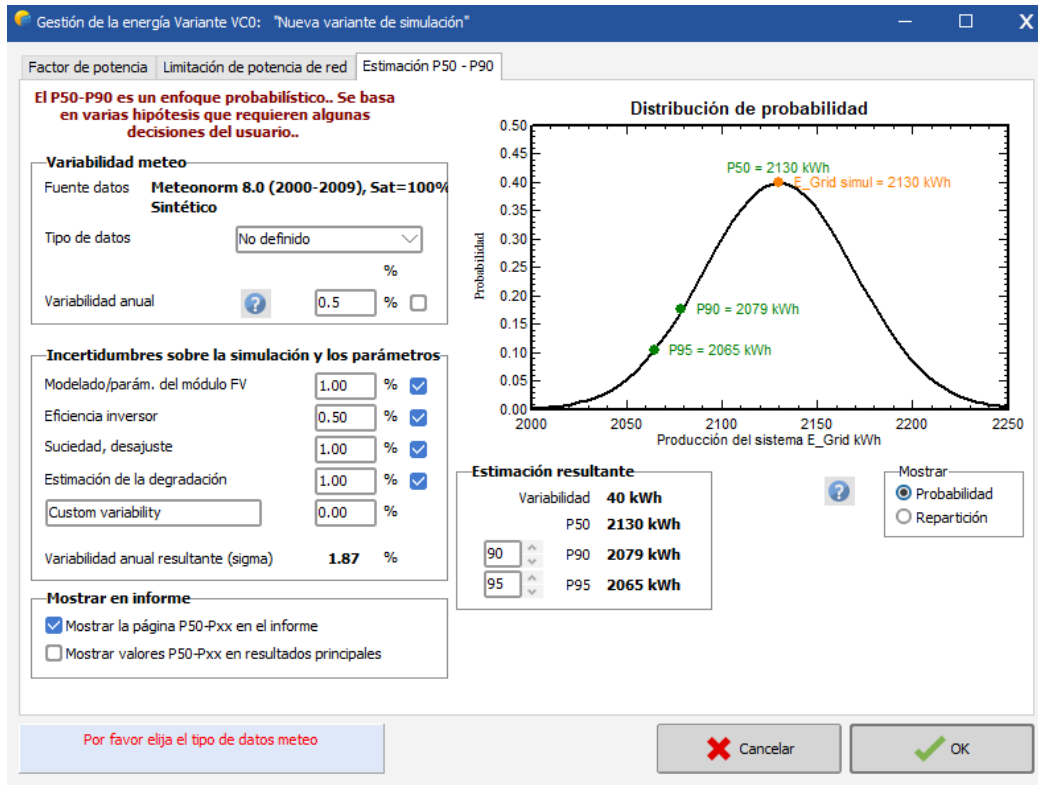


Figura 46. Curva de distribución normal de la producción del sistema fotovoltaico.

**Resumen del sistema**  
Proyecto: Instalación de SFV bifacial  
Conjunto FV, Pnom = 1.2 kWp Sistema conectado a la red  
Energía producida 2130 kWh/año

**Resumen financiero**  
Costes de instalación 1'043.12 USD  
Costo total anual -250.00 USD/año  
LCOE 0.078 USD/kWh  
Período de recuperación 4.2 años

**Costos de instalación**

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
Módulos FV			312.00 USD
Inversores			600.00 USD
Otros componentes			0.00 USD
Estudios y análisis			0.00 USD
Instalación			131.12 USD
Seguro			0.00 USD
Costos del terreno			0.00 USD
Cargos bancarios del préstamo	0.00	0.00	0.00 USD
Impuestos			0.00 USD
<b>Costo total de instalación</b>			<b>1'043.12 USD</b>
Activo amortizable			912.00 USD

**Costos de operación (anual)**

Descripción	Costo anual
Mantenimiento	0.00 USD
Alquiler de terrenos	0.00 USD
Seguro	0.00 USD
Cargos bancarios	0.00 USD
Administrativo, contabilidad	0.00 USD
Impuestos	0.00 USD
Subsidios	250.00 USD
<b>Costos de operación (OPEX)</b>	<b>-250.00 USD/año</b>

Botones: Cancelar, OK

Figura 47. Estudio económico de la instalación.

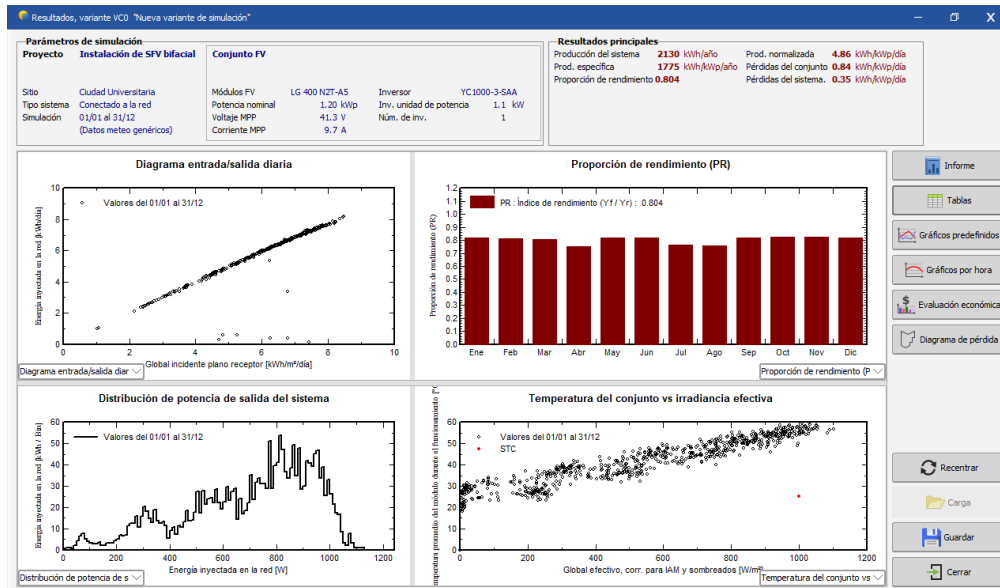


Figura 48. Resultados obtenidos de la simulación.

### 3.3.1.1 comparación de diseño de forma manual y simulado en PVSist

#### Diseño de instalación fotovoltaica bifacial.

La instalación se desarrolla para una potencia nominal de 1.56kWp

Para poder seleccionar los datos adecuados del módulo en cuanto a la ganancia bifacial se debe especificar el albedo y la altura a la cual será instalado el sistema. El sistema se instalará a la altura de 2m en una superficie color blanco.

$A=0.8$  y  $h=2m$ .

Con estos parámetros se puede calcular la ganancia a la cual estará operando. El módulo fotovoltaico a utilizar es el LG400N2T-A5.

#### Electrical Properties (STC<sup>3</sup>)

	LG400N2T-A5	Bifacial Gain <sup>3</sup>				LG390N2T - A5	Bifacial Gain <sup>3</sup>				
		5%	10%	20%	30%		5%	10%	20%	30%	
Maximum Power (Pmax)	[W]	400	420	440	480	520	390	410	429	468	507
MPP Voltage (Vmpp)	[V]	41.5	41.5	41.5	41.6	41.6	41.4	41.4	41.4	41.5	41.5
MPP Current (Impp)	[A]	9.65	10.13	10.61	11.55	12.51	9.43	9.90	10.36	11.28	12.22
Open Circuit Voltage (Voc)	[V]	49.7	49.7	49.7	49.8	49.8	49.2	49.2	49.2	49.3	49.3
Short Circuit Current (Isc)	[A]	10.22	10.73	11.24	12.26	13.29	10.15	10.15	11.17	12.18	13.20
Module Efficiency	[%]	18.9	19.9	20.8	22.7	24.6	18.5	19.4	20.3	22.1	24.0
Operating Temperature	[°C]	-40 ~ +90									
Maximum System Voltage	[V]	1000									
Maximum Series Fuse Rating	[A]	20									
Pmax Bifaciality Coefficient <sup>4</sup>	[%]	76									
Power Tolerance	[%]	0 ~ +3									

Figura 49. Especificaciones eléctricas del módulo LG400N2T-A5.

Para obtener la irradiancia en la parte posterior del panel se utiliza las gráficas de la guía de diseño bifacial de LG para un albedo de 0.8.

Material	Reflectance*(R)	Grear at 1000Wm <sup>-2</sup> front
Asphalt	0.1	70 Wm <sup>-2</sup>
Light soil	0.21	130 Wm <sup>-2</sup>
Concrete	0.28	170 Wm <sup>-2</sup>
Beige built-up roofing	0.43	250 Wm <sup>-2</sup>
White EPDM roofing	0.8	430 Wm <sup>-2</sup>

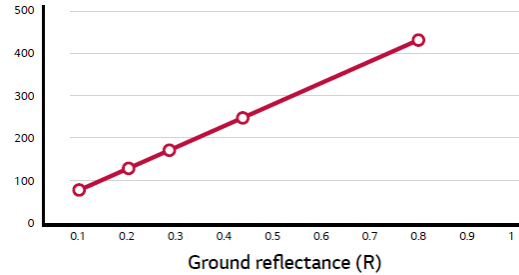


Figura 50. Irradiancia en función del albedo en condiciones STC.

Se puede observar que con un albedo de 0.8 se obtiene una irradiancia posterior de 430W/m<sup>2</sup>. Debido a que la altura es de 2m y utilizando el concepto de altura normalizada la cual relaciona la altura en función de la longitud del panel.

Lpv=2.064m

$$H = \frac{2m}{2.064m}(100) = 0.96(100) = 96\%$$

Lo que significa que la energía de albedo sería uniforme en el panel en un 96%.

La relación de cobertura de la tierra considerando que una distancia de paso de 6m.

$$GCR = \frac{\text{Area del módulo}}{\text{Área de cobertura}}(100) = \frac{2.064m(1.024m)}{6m(1.024m)}(100) = 34.4\%$$

Para este valor de GCR se considera un 2% de pérdidas.

P=irradiancia de perdida por GCR =0.98.

En base a los datos obtenidos calculamos la ganancia bifacial a la cual estaría generando el sistema en la irradiancia máxima.

$$\text{Irradiancia posterior} = \phi HGCR Ir_{\text{albedo}} = 0.76(0.96)(0.98)(430) \frac{W}{m^2} = 313 \frac{W}{m^2}$$

$$GB = \frac{\text{Irradiancia posterior}}{\text{Irradiancia frontal}}(100) = \frac{313 \frac{W}{m^2}}{1100 \frac{W}{m^2}}(100) = 27.37\%$$

Esto significa que nuestro diseño se hará en base a los datos con una ganancia del 30% como se observa en la Figura 49.

✚ Efectos de la temperatura.

Para San Salvador la temperatura normal ronda entre los 15°C a baja temperatura y 33°C en

$$T_{\text{celdaMax}} = G * \frac{(T_{\text{onc}} - 20)}{800} + T_a$$

Donde:

G=irradiancia esperada en el plano del módulo [W/m<sup>2</sup>]

Ta=Temperatura ambiente [°C].

Tonc= Temperatura nominal de operación para el peor caso [°C].

$$T_{celdaMax} = \frac{1100 \frac{W}{m^2} (48^\circ C - 20^\circ C)}{800 \frac{W}{m^2}} + 25^\circ C$$

$$T_{celdaMax} = 63.5^\circ C$$

Para mayor confiabilidad del diseño se le dará un margen de 5°C a la temperatura.

$$T_{celdaMax} = 70^\circ C$$

$$T_{celdaMin} = 10^\circ C$$

Entonces a partir de estos datos obtenemos los gradientes de temperatura:

$$\Delta T_{m\acute{a}x} = 70^\circ C - 25^\circ C = 45^\circ C$$

$$\Delta T_{m\acute{i}n} = 10^\circ C - 25^\circ C = -15^\circ C$$

Con estos datos de temperatura se calcula nuevos valores de Voc y Vmp:

✚ Para Voc

$$V_{oc70^\circ C} = \beta(\Delta T_{m\acute{a}x})(V_{oc}) + V_{oc}$$

$$V_{oc|70^\circ C} = \frac{-0.27}{100} (45^\circ C)(49.8) + 49.8 = 43.75V$$

$$V_{oc70^\circ C} = \beta(\Delta T_{m\acute{i}n})(V_{oc}) + V_{oc}$$

$$V_{oc|10^\circ C} = \frac{-0.27}{100} (-15^\circ C)(49.8) + 49.8 = 51.82$$

✚ Para Vmp

$$V_{mp70^\circ C} = \gamma(\Delta T_{m\acute{a}x})(V_{mp}) + V_{mp}$$

$$V_{mp|70^\circ C} = \frac{-0.36}{100} (45^\circ C)(41.6) + 41.6 = 34.86V$$

$$V_{mp10^\circ C} = \gamma(\Delta T_{m\acute{i}n})(V_{mp}) + V_{mp}$$

$$V_{mp|10^\circ C} = \frac{-0.36}{100} (-15^\circ C)(41.6) + 41.6 = 43.84V$$

Parámetro	10°C	70°C
Voc [V]	51.82	43.75
Vmp[V]	43.84	34.86

Tabla 9. Datos obtenidos de forma manual.

Rango de la ventana de entrada del inversor =34.86V a 51.82V

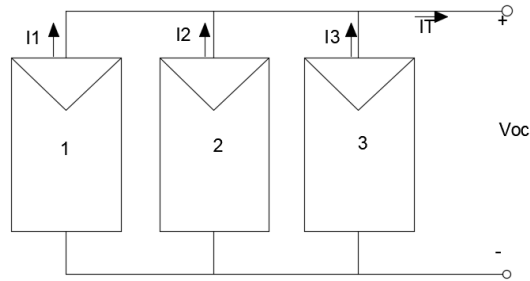


Figura 51. Conexión de sistema bifacial.

Cálculo de Corrientes con la variación de temperatura para las corrientes Isc e Impp.

✚ Para Isc

$$Isc_{70^{\circ}C} = \alpha(\Delta T_{m\acute{a}x})(Isc) + Isc$$

$$Isc_{70^{\circ}C} = \frac{0.03}{100}(45)(13.29) + 13.29 = 13.48A$$

$$Isc_{10^{\circ}C} = \alpha(\Delta T_{m\acute{a}x})(Isc) + Isc$$

$$Isc_{10^{\circ}C} = \frac{0.03}{100}(-15)(13.29) + 13.29 = 13.22A$$

✚ Para Impp

$$Impp_{70^{\circ}C} = \alpha(\Delta T_{m\acute{a}x})(Impp) + Impp$$


$$Impp_{70^{\circ}C} = \frac{0.03}{100}(45)(12.51) + 12.51 = 12.68A$$

$$Impp_{10^{\circ}C} = \alpha(\Delta T_{m\acute{a}x})(Impp) + Impp$$

$$Impp_{10^{\circ}C} = \frac{0.03}{100}(-15)(12.51) + 12.51 = 12.45A$$

$$Isc_{bifacial} = IT = I1 + I2 + I3 = 3Isc_{70^{\circ}C} = 3(13.48) = 40.44A$$

Observando las características del inversor YC 1000-3-3-SAA del fabricante APsystems.

	<b>YC1000-3 de APsystems</b>
	<p>Datos que necesitamos para el cálculo:</p> <p>Pmax = 1.1 kW  ΔMpp = 16-55V  Iinput= 60 A  Vmax= 60V</p>

$$V_{OC \text{ Max SFV}} \leq V_{Max \text{ Inversor}} \rightarrow 51.82 \leq 55V$$

$$V_{Min \text{ SFV}} \geq V_{MPPT \text{ Min Inversor}} \rightarrow 34.86 \geq 16V$$

$$I_{SC \text{ bifacial}} < I_{max \text{ inversor}} \rightarrow 40.44 < 60$$

En lado AC.

Potencia=900W

Tensión AC=120VAC

Frecuencia=50/60Hz.

Factor de potencia>99%

Distorsión Armónica<3%

Eficiencia máxima=99.9%

Eficiencia estable=99.5%

Se puede observar que el inversor cumple los requerimientos de la instalación fotovoltaica.

#### **Calculando la producción del sistema.**

Cálculo de Ganancia Anual

Potencia Instalada

Potencia de MFV 520 Wp

MFV por string 3

Numero de string: 1

**Potencia instalada 1.56 kWp**

**Para la potencia anual se utilizará un valor de Yf = 1500 kWh/kWp**

Multiplicando el valor de la potencia instalada en MFV por el valor del registro Yf

$$1.56 \text{ kwp} * 1500 \frac{\text{kWh}}{\text{kWp}} / \text{año} = 2340 \text{ kWh/año}$$

### Diseño en programa PVsyst.

En PVsyst elegimos el sitio de la instalación, luego cargamos los datos meteorológicos de metenorm para la simulación, posteriormente se elige la orientación y se configura la distancia de paso.

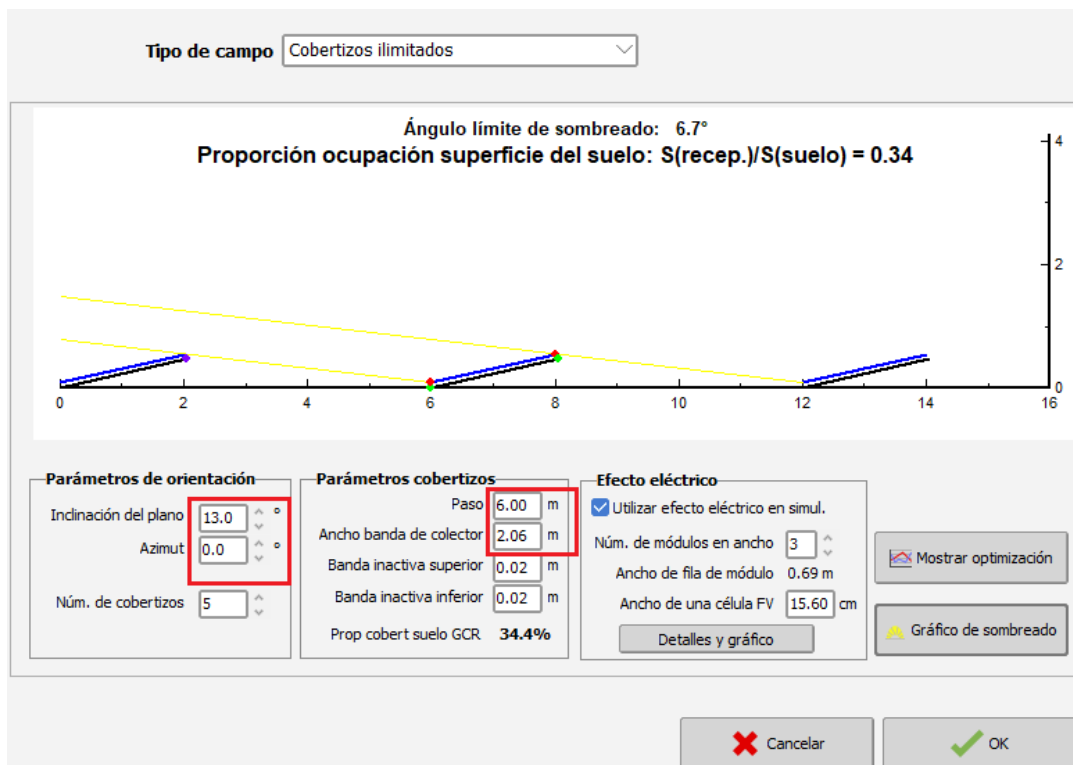


Figura 52. Configuración de la orientación y la distancia de paso.

Luego en el apartado de sistema se elige el panel y el inversor adecuado.

**Nombre y orientación del subconjunto**  
 Nombre:  Indinación: **13°**  
 Oriente: **Cobertizos ilimitados** Azimut: **0°**

**Ayuda de pre-dimensionamiento**  
 Sin dimensionamiento Ingrese potencia planeada:  kWp  
 ... o área disponible(módulos):  m<sup>2</sup>

**Seleccione el módulo FV**  
 Disponible ahora:  Filtro:  **Módulo bifacial**  Sistema bifacial  
 LG Electronics  Desde 2017 Manufacturer 2017   
 Usar optimizador  
 Voltajes de dimensionamiento: Vmpp (60°C) **36.1 V**  
 Voc (-10°C) **55.4 V**

**Seleccione el inversor**  
 Disponible ahora:  Voltaje de salida 230 V Tri 50Hz  50 Hz  60 Hz  
 APsystems  Desde 2014   
 Núm. de inversores:   Voltaje de funcionamiento: **16-55 V** Poder global inversor: **1.1 kWca**  
 Voltaje máximo de entrada: **60 V**

**Diseñe el conjunto**  
**Núm. de módulos y cadenas**  
 Mód. en serie:   Única posibilidad 1  
 Núm. de cadenas:   
 Pérdida sobrecarga: **0.0 %**  
 Proporción Pnom: **1.06**

**Condiciones de operación**  
 Vmpp (60°C): 36 V  
 Vmpp (20°C): 42 V  
 Voc (-10°C): 55 V

Irradia. plano: **1000 W/m<sup>2</sup>**  
 Impp (STC): 29.2 A  
 Isc (STC): 30.7 A  
 Isc (en STC): 30.7 A

Máx. en datos  STC  
 Potencia de funcionamiento máx.: **1.1 kW**  
 (en 1000 W/m<sup>2</sup> y 50°C)  
**Potencia nom. conjunto (STC) 1.2 kWp**

**Núm. de módulos** 3 **Área** 6 m<sup>2</sup>

Figura 53. Diseño del sistema seleccionando panel y el inversor.

Posteriormente en el apartado de sistema bifacial se configura el albedo y la altura sobre el nivel del suelo.

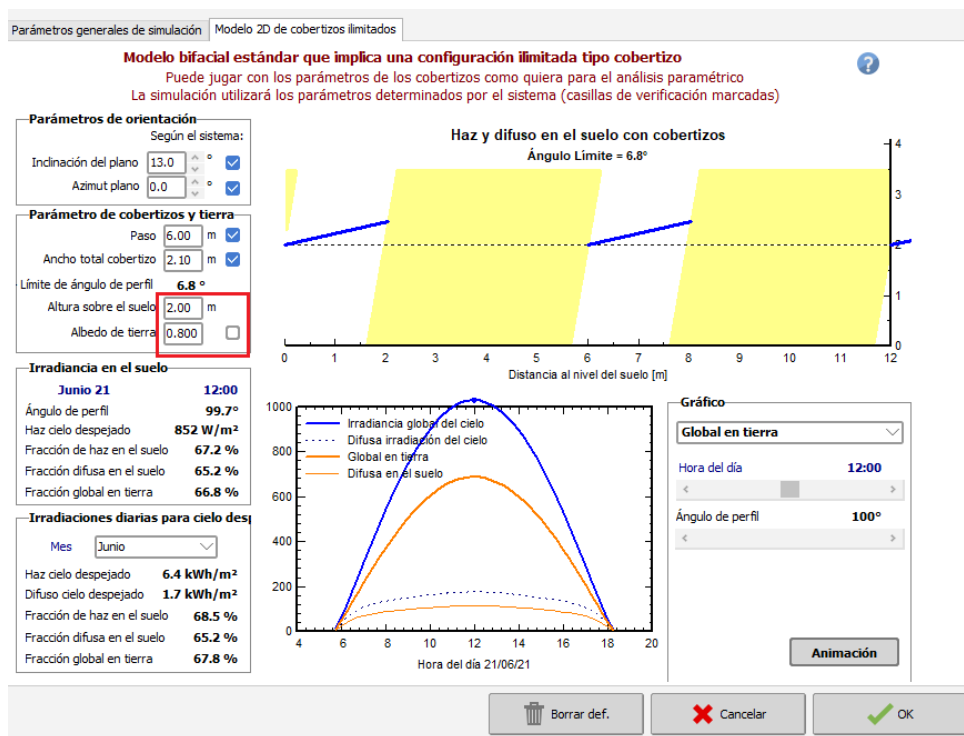


Figura 54. Configuración de albedo y altura sobre el suelo.

El análisis de temperatura en el programa.

<p>TOper <input type="text" value="10"/> °C ?</p> <p>Coef. temper. <b>-0.34 %/°C</b></p> <p>Voltaje Vmpp <b>44.0 V</b></p> <p>Circuito abierto Voc <b>52.6 V</b></p> <p>/ Área módulo <b>19.97 %</b></p>	<p>TOper <input type="text" value="70"/> °C ?</p> <p>Coef. temper. <b>-0.44 %/°C</b></p> <p>Voltaje Vmpp <b>35.2 V</b></p> <p>Circuito abierto Voc <b>44.1 V</b></p> <p>/ Área módulo <b>15.86 %</b></p>
--	--

Tabla 10. Datos proporcionados por PVsyst en ambas condiciones de temperatura.

Como se observa en la Tabla 9 y Tabla 10 al comparar ambos resultados con los calculados, se observa que los valores dan bastante cercanos.

✚ Resultado obtenido de la simulación de PVsyst.

Resultados principales			
Producción del sistema	<b>2566 kWh/año</b>	Prod. normalizada	<b>5.86 kWh/kWp/día</b>
Prod. específica	<b>2139 kWh/kWp/año</b>	Pérdidas del conjunto	<b>-0.11 kWh/kWp/día</b>
Proporción de rendimiento	<b>0.968</b>	Pérdidas del sistema	<b>0.31 kWh/kWp/día</b>

Figura 55. Resultado obtenido de la simulación de PVsyst.

Se puede observar que el dato calculado comparado con el dato obtenido de PVsyst da un resultado cercano.

### 3.3.2 Geometría de la instalación.

#### 3.3.2.1 Altura.

La altura que tenemos con respecto al suelo esto afecta el área reflejada por tanto afecta la radiación difusa que va a captar el panel bifacial por la parte posterior (parte de abajo), la altura mínima que se recomienda es de 1 metro.



Figura 56. Altura respecto al suelo influye en el área reflejada.

### 3.3.2.2 Elevación del módulo

Es importante para asegurar suficiente espacio entre el módulo y el suelo para obtener más reflejo de la luz solar, lo que resulta en una mayor ganancia bifacial. Por lo tanto, la altura del módulo también es uno de los principales factores que tiene un impacto significativo en la ganancia bifacial. La altura del módulo (elevación) se define como la distancia entre la parte inferior de la parte más baja del módulo y el suelo (superficie).

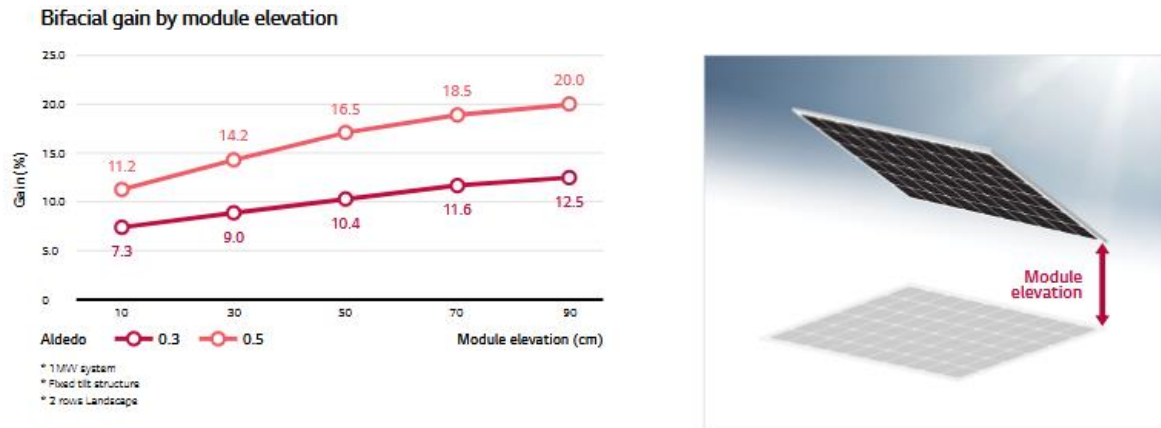


Figura 57. Ganancia vs elevación del módulo de guía de diseño bifacial LG [8].

### 3.3.2.3 Distancia.

Entre más grande sea la distancia entre líneas de paneles, mayor será el área reflejada y nos permite una mayor ganancia.



Figura 58. A mayor distancia los arreglos de paneles se tiene mayor reflexión.

### 3.3.2.4 Sombreado

Uno de los cuidados que se debe de tener con los paneles bifaciales es el sombreado en el parte posterior generado por la estructura donde está montado, ya que en los paneles monofaciales no se toma en cuenta esto, en los bifaciales es bastante importante debido a que afecta en la ganancia.

### 3.3.3 El albedo

La proporción de irradiación solar el medido que es reflejada por el suelo es medida por el albedo y esta depende de diferentes factores entre los que se pueden destacar la naturaleza del suelo o la posición del sol.

Equipos como un albedómetro serian útiles para obtener resultados más representativos, puede ser útil realizar mediciones durante al menos 12 meses, pero no es adecuado, por ejemplo, en zonas con fuertes nevadas. También es importante asegurarse de que el terreno en el que se realice la medición sea representativo de las condiciones a largo plazo, es decir, de las condiciones después de la construcción de la instalación solar, durante la operación de la misma.

$$\text{Albedo} = \frac{\text{Luz reflejada}}{\text{Luz incidente}}$$

Tipo de terreno	Rango de albedo
Hierba	0.15-0.25
Hierba alta	0.26
Hierba fresca	0.16
Asfalto seco	0.09-0.15
Asfalto húmedo	0.18
Concreto	0.25-0.35
Concreto pintado de blanco	0.6-0.8
Tejas rojas	0.33
Alumino	0.85
Acero galvanizado nuevo	0.35
Acero galvanizado sucio	0.08
Gravilla blanca	0.27
Arena seca de desierto	0.36-0.4
Arena	0.42
Arena blanca	0.62
Suelo	0.33
Desierto	0.24-0.28
Campos de diversos tipos	0.03-0.25
Bosque verde	0.03-0.10
Pasto en diversas condiciones	0.14-0.37
Hielo o nieve	0.46-0.86

Tabla 11. Albedos correspondientes a diferentes tipos de superficies.

### 3.4 Importancia del albedo.

El albedo es uno de los factores muy importantes en la producción de energía con paneles bifaciales ya que según el tipo de albedo que se utilice, así será la ganancia de energía, no se puede esperar una ganancia de 30% si se usa un albedo de 8%.

Según el tipo de superficie sobre el que esté instalado el módulo bifacial así será la ganancia que se obtiene, por ejemplo, según la empresa JINKO SOLAR si la superficie es pintura blanca se puede obtener 19% de ganancia, si es agua se obtiene el 5% de ganancia.

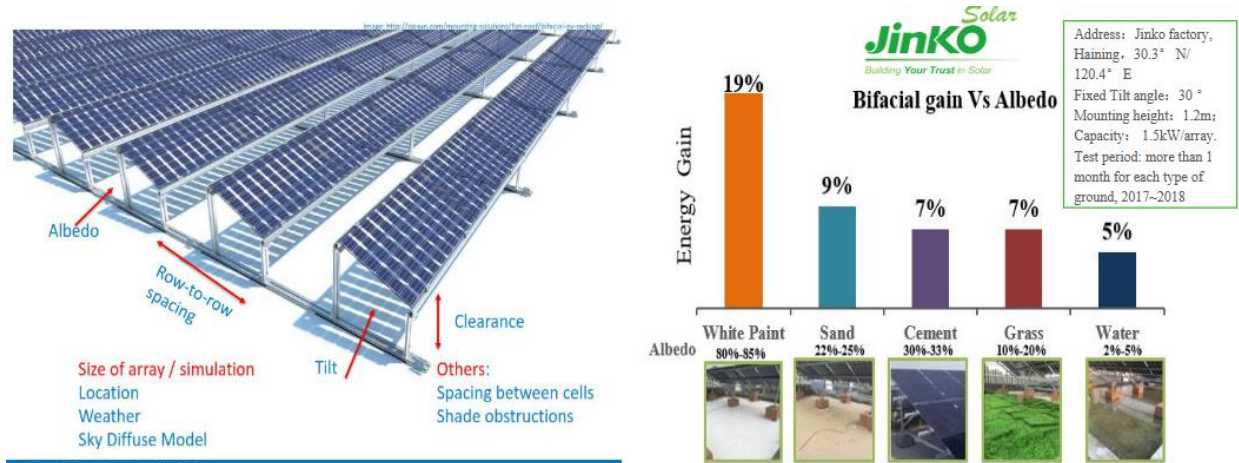


Figura 59. Ganancia con respecto al albedo.

### 3.5 Latitud.

Dependiendo de la latitud en la que se encuentre será la radiación difusa que recibirá el panel, y así obtiene mejor porcentaje de ganancia.

Según catálogos de LG Electronics, y del fabricante Solar World, concluyen que la ganancia obtenida de la energía crece con la elevación, pero llega al punto de saturación cuando es llevado a la altura de 1m, más sin embargo la empresa, Sun x. et al, proporciona una ecuación que fue obtenida por medio de regresión la cual se describe de la forma siguiente [8].

$$E_0 = H(-Lat(0.028Ra + 0.009) + 3.3Ra + 0.4$$

Donde:

Si  $E_0 \leq 0 \therefore E_{95} = 0$ ; y si  $E_0 > 0 \therefore E_{95} = E_0$

Siendo:

$E_{95}$ : Mínima elevación para lograr al menos el 95% de la máxima energía del módulo.

H: Largo del módulo.

Lat: Latitud.

Ra: Coeficiente de albedo.

Sin embargo, cuanto más se aumenta la elevación, el costo de la estructura aumenta y se debe considerar el factor económico.

En cuanto a los arreglos de los estrings anterior y siguiente, deben tener una distancia en la que se consideren dos factores que son la cantidad de energía y el factor económico.

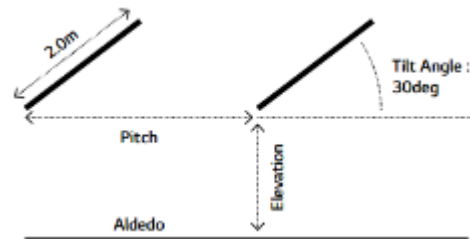


Figura 60. Distancia entre la fila anterior y siguiente.

### 3.6 Estructura de la instalación.

A diferencia de las estructuras usadas para los paneles convencionales. Las estructuras para paneles bifaciales se diseñan para que no produzcan mucha sombra.

Factor de sombreado de estructura es el sombreado de cualquier obstáculo entre el suelo y su parte trasera sensible, es la relación entre el área mecánica y el área sensible. Al estar cerca del lado posterior, se obtendrá una falta de coincidencia eléctrica: la corriente en una cadena es la corriente en la peor celda, si la parte mecánica cubre x% de una celda, el efecto de sombreado será x%.



Figura 61. Diferentes estructuras de arreglos de paneles bifaciales.

Las estructuras varían de tipo de material de construcción, estando entre ellas algunas compuestas por piezas en HDG y magnelis, así como también se encuentran de aluminio.

Al no tener partes móviles el mantenimiento de la estructura es casi nulo.



*Figura 62. Estructura de soporte para paneles bifaciales.*

La empresa SolarFix ofrece un diseño que puede adaptarse a cualquier tipo de terreno y a cualquier climatología. Además, es compatible con cualquier módulo disponible en el mercado, incluidos los de capa fina y los bifaciales.

En el mercado existen fabricantes que ofrecen estructuras con seguidores, los cuales con un pequeño motor mueven el panel en dirección del sol aumentando así la producción de energía. Estas estructuras si requieren de un mantenimiento ya que contienen partes móviles.

## **Capítulo 4. Diseño e instalación de pequeña planta monofacial y bifacial**

### **4.1 Diseño del panel monofacial**

#### **4.1.1 Sistema fotovoltaico conectado en red.**

Los sistemas fotovoltaicos conectados en red están compuestos por un conjunto de elementos los cuales transforman la energía solar en energía eléctrica, la energía generada se puede inyectar en la red eléctrica.

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico se debe tener en cuenta las características del panel a ser utilizado para poder elegir el inversor que se acople con las especificaciones del panel de esta forma se puede asegurar que la producción sea la más optima posible.

En un sistema fotovoltaico conectado a la red, el inversor se encarga de la conversión de la potencia generada en el régimen continuo al régimen alterno, es decir recibe la potencia de corriente directa y la convierte en corriente alterna, pero este elemento también se encarga de la operación en el punto de máxima potencia de la generación fotovoltaica y del acoplamiento en la red de la energía generada.

El inversor para poder acoplar la energía generada a la red utiliza como parámetros la tensión y la frecuencia, en algunos casos avanzados se utiliza la impedancia de la red en el punto de la conexión a la red, con estos parámetros el sistema de control hace que el inversor se sincroniza con la red.

Para la especificación del inversor se debe tener en cuenta el voltaje de salida del sistema fotovoltaico, la ventana del punto de máxima potencia la cual es un intervalo de tensión donde el inversor puede alcanzar el punto de máxima potencia y la corriente de entrada.

Al momento de especificar un inversor debe tenerse en cuenta si será conectado en red o aislado, en el entendido que un inversor conectado en red solo podrá operar con la presencia de señal en la red eléctrica, si en algún caso se desea operar con ausencia de red se debe utilizar el inversor aislado el cual operaría cuando la red de suministro de la distribuidora falle.

Para la especificación del inversor se debe tener en cuenta el estándar std IEEE 519, referente a los niveles de distorsión, los márgenes de desconexión de los inversores en cuanto a tensión y a frecuencia.

## 4.1.2 Criterios de dimensionamiento del inversor.

### 4.1.2.1 En el lado de DC se deben obtener los parámetros siguientes.

- ✚ Potencia nominal.
- ✚ Potencia máxima.
- ✚ Tensión nominal.
- ✚ Tensión máxima soportada por el inversor.
- ✚ Rango de variación de la ventana de MPPT.

$$V_{OC\ Max\ SFV} \leq V_{Max\ Inversor}$$

$$V_{Min\ SFV} \geq V_{MPPT\ Min\ Inversor}$$

$$V_{Max\ SFV} \leq V_{MPPT\ Max\ Inversor}$$

Donde:

$V_{OC\ Max\ SFV}$ : Tensión sin carga de los módulos fotovoltaicos correspondiente a la mínima temperatura esperada para los módulos en voltios.

$V_{Max\ SFV}$ : Es la tensión máxima del sistema fotovoltaico correspondiente a la mínima temperatura esperada en los módulos en voltios.

$V_{Min\ SFV}$ : Es la tensión mínima del sistema fotovoltaico que corresponde a la máxima temperatura esperada en los módulos en voltios.

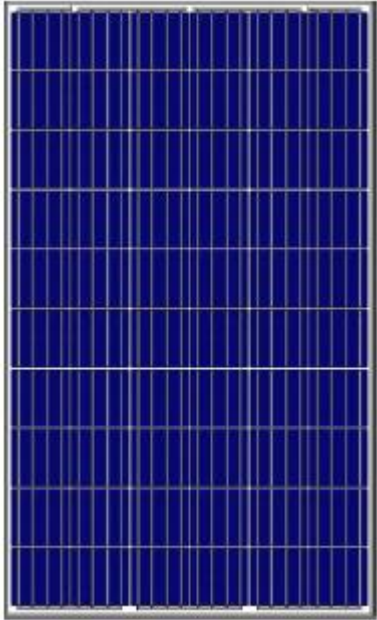
$V_{Max\ Inversor}$ : Es la tensión máxima que soporta el inversor en voltios.

$V_{MPPT\ Min\ Inversor}$ : Es la tensión mínima que admite el inversor en voltios.

$V_{MPPT\ Max\ Inversor}$ : Es la tensión máxima que admite el inversor.

### 4.1.2.2 En el lado de AC se deben observar los parámetros siguientes.

- ✚ Potencia nominal.
- ✚ Potencia máxima.
- ✚ Rango de temperatura para el suministro de potencia.
- ✚ Intensidad nominal.
- ✚ Intensidad máxima suministrada.
- ✚ Tensión máxima.
- ✚ Distorsión del factor de potencia.
- ✚ Eficiencia de conversión máxima.
- ✚ Eficiencia con carga parcial.
- ✚ Eficiencia al 100%.

	<b>Módulo policristalino 6P30</b>
	<p style="text-align: center;">Datos requeridos para los cálculos:</p> <p> <math>P_{max}=280W</math>  <math>V_{oc}=38.6 V</math>  <math>I_{sc}= 9.31 A</math>  <math>V_{mpp}=31.5 V</math>  <math>I_{mpp}=8.89 A</math>  <math>\eta=17.21\%</math>  Rango de operación de temperatura=<math>-40^{\circ}C</math> a <math>85^{\circ}C</math>  <math>V_{max}=1000V DC</math> </p> <p> <math>\alpha = 0.05\%/^{\circ}C</math>  <math>\beta= -0.31\%/^{\circ}C</math>  <math>\gamma= -0.41\%/^{\circ}C</math> </p> <p>Nominal Operating Cell Temperature <math>45^{\circ}C \pm 2^{\circ}C</math></p>

*Figura 63. Panel monofacial AS-6P30 de 280Wp.*

#### 4.1.3 Efectos de la temperatura en el panel monofacial.

Para San Salvador la temperatura normal ronda entre los  $15^{\circ}C$  a baja temperatura y  $33^{\circ}C$  en verano, pero en el 2002 se tiene registro de una temperatura de  $42.5^{\circ}C$  siendo la más alta hasta la fecha [9].

$$T_{celdaMax} = G * \frac{(T_{onc}-20)}{800} + T_a$$

Donde:

G=irradiancia esperada en el plano del módulo [ $W/m^2$ ]

Ta=Temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ].

Tonc= Temperatura nominal de operación para el peor caso [ $^{\circ}C$ ].

$$T_{celdaMax} = \frac{1100 \frac{W}{m^2} (47^{\circ}C - 20^{\circ}C)}{800 \frac{W}{m^2}} + 25^{\circ}C$$

$$T_{celdaMax} = 62.13^{\circ}C$$

Para mayor confiabilidad del diseño se le dará un margen de  $5^{\circ}C$  a la temperatura, y tomando en cuenta el aumento de temperatura que se da por año, por lo tanto, nuestra Tcelda será:

$$T_{celdaMax} = 70^{\circ}C$$

$$T_{\text{celdaMin}} = 10^{\circ}\text{C}$$

Entonces a partir de estos datos obtenemos los gradientes de temperatura:

$$\begin{aligned}\Delta T_{\text{máx}} &= 70^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = 45^{\circ}\text{C} \\ \Delta T_{\text{mín}} &= 10^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = -15^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Con estos datos de temperatura se calcula nuevos valores de Voc y Vmp:

✚ Para Voc

$$\begin{aligned}V_{oc70^{\circ}\text{C}} &= \beta(\Delta T_{\text{máx}})(V_{oc}) + V_{oc} \\ V_{oc|70^{\circ}\text{C}} &= \frac{-0.31}{100}(45^{\circ}\text{C})(38.6) + 38.6 = 33.22 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_{oc70^{\circ}\text{C}} &= \beta(\Delta T_{\text{mín}})(V_{oc}) + V_{oc} \\ V_{oc|10^{\circ}\text{C}} &= \frac{-0.31}{100}(-15^{\circ}\text{C})(38.6) + 38.6 = 40.39 \text{ V}\end{aligned}$$

✚ Para Vmp

$$\begin{aligned}V_{mp70^{\circ}\text{C}} &= \gamma(\Delta T_{\text{máx}})(V_{mp}) + V_{mp} \\ V_{mp|70^{\circ}\text{C}} &= \frac{-0.41}{100}(45^{\circ}\text{C})(31.5) + 31.5 = 25.69 \text{ V}\end{aligned}$$

$$V_{mp10^{\circ}\text{C}} = \gamma(\Delta T_{\text{mín}})(V_{mp}) + V_{mp}$$

$$V_{mp|10^{\circ}\text{C}} = \frac{-0.41}{100}(-15^{\circ}\text{C})(31.5) + 31.5 = 33.44 \text{ V}$$

Parámetro	10°C	70°C
Voc [V]	40.39	33.22
Vmp[V]	33.44	25.69

Tabla 11. Resultados de Voc y Vmp para la temperatura de Celda en San Salvador.

Como se puede observar en la Tabla 11 el valor máximo es de 40.39V y el mínimo es de 25.69V, por lo tanto, el inversor debe tener una ventana de mpp en ese rango.

## 4.2 Diseño de la generación del panel bifacial.

Para poder formar el panel bifacial se debe realizar la conexión en paralelo de dos paneles monofaciales por medio de conectores en Y compatible con conector MC4 [10]. En la Figura 64 se puede observar que cuando conectamos en paralelo, la tensión en ambos paneles es la misma, pero la corriente que produce cada panel se suma para obtener una mayor producción. La corriente total producida sería el equivalente de la producción de un panel fotovoltaico bifacial. El módulo fotovoltaico 1 se orienta hacia arriba, en el mismo plano, pero con la orientación hacia el suelo se coloca el panel fotovoltaico 2, debido a que el panel fotovoltaico 1 estará recibiendo la irradiancia global

estaría teniendo una mayor producción que el panel fotovoltaico 2, donde la producción del panel 2 dependerá de la irradiancia reflejada y del albedo de la superficie del sitio de la instalación.

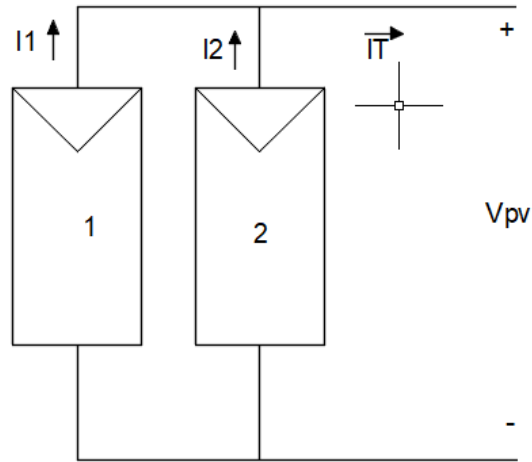


Figura 64. Conexión de dos módulos monofaciales para formar un bifacial.

Para poder obtener la corriente que puede producir el panel posterior, se hace el cálculo para un albedo de 0.8 que corresponde a concreto pintado de blanco como se puede ver en la Tabla 11, para obtener la irradiancia reflejada se hace uso de la ecuación para el albedo y utilizando la irradiancia de 1000W/m<sup>2</sup> correspondiente a las condiciones STC.

$$\text{Albedo} = \frac{\text{Luz reflejada}}{\text{Luz incidente}}$$

$$\text{Luz reflejada} = \text{Albedo} * \text{Luz incidente}$$

$$\text{Luz reflejada} = 0.8 \left( 1000 \frac{W}{m^2} \right) = 800 \frac{W}{m^2}$$

Con el resultado obtenido y por medio de la corriente de cortocircuito del panel fotovoltaico policristalino 6P30 se obtiene la corriente de cortocircuito con la condición de 800W/m<sup>2</sup>.

$$I_{sc_{800}} = I_{sc} \frac{800 \frac{W}{m^2}}{1000 \frac{W}{m^2}}$$

$$I_{sc_{800}} = (9.31A) \frac{800 \frac{W}{m^2}}{1000 \frac{W}{m^2}} = 7.45A$$

Por lo tanto, la corriente de cortocircuito máxima esperada del panel fotovoltaico bifacial será la suma de ambas corrientes.

$$I_{SC\_bifacial} = 9.31A + 7.45A = 16.76A$$

#### 4.2.1 Características del microinversor.

Los microinversores se encargan de transformar la corriente directa de un panel fotovoltaico en corriente alterna, para poder tener acceso a la energía y poder utilizarla en los diferentes equipos electrónicos. Las salidas de los microinversores es combinada para que sea posible el suministro a la red eléctrica.

La principal diferencia entre los microinversores y los inversores es que los microinversores permiten ir agregando la producción de un solo panel al arreglo fotovoltaico. Es decir, cada módulo maximiza su producción incrementando su eficiencia de hasta un 20%.

En la generación del diseño bifacial se utilizará un microinversor que se adapte a las características de las tensiones en circuito abierto y en el punto de máxima potencia.

Con los parámetros calculados para el arreglo bifacial, se procede al dimensionamiento del microinversores.

El microinversor que se selecciona, es el solarEpic de 1000W como se muestra en la Figura 65.



Figura 65. Microinversor solarEpic de 1000W.

Para poder comprobar que cumpla con las características de nuestro diseño se observa sus parámetros eléctricos en la Figura 65.

En lado de DC.

Potencia nominal=1000W.

Tensión máxima=45V.

Ventana de MPPT=24-45V.

Corriente máxima=60A.

$$V_{OC\ Max\ SFV} \leq V_{Max\ Inversor} \rightarrow 40.39 \leq 45V$$

$$V_{Min\ SFV} \geq V_{MPPT\ Min\ Inversor} \rightarrow 25.69 \geq 45V$$

$$I_{SC\ bifacial} < I_{max\ inversor} \rightarrow 16.76 < 60$$

En lado AC.

Tensión AC=120VAC

Frecuencia=50/60Hz.

Factor de potencia>97.5%

Distorsión Armónica<5%

Eficiencia máxima=87%

Eficiencia estable=84%

Se puede observar que el inversor cumple los requerimientos de la instalación fotovoltaica.

**Technical Parameters:**

Rated Power	1000W		
Compatible with Solar Panels	36 cells/18V Vmp: 18-21V; Voc: 20-24V	60 cells/24V Vmp: 26-30V; Voc: 34-38V	72 cells/36V Vmp: 35-39V; Voc: 42-46V
DC Input Range	10.8-28V	20-45V	24-45V
MPPT Voltage	15-23VDC	24-34VDC	26-36VDC
DC MAX. Current	80A	60A	50A
AC Output	120VAC(90-140VAC) or 230VAC(190-260VAC)		
Frequency	50Hz/60Hz(Auto control)		
Power Factor	>97.5%		
THD	<5%		
Phase Shift	<2%		
Efficiency	120VAC(90-140VAC)		
Peak Efficiency	82%	87%	87%
Stable Efficiency	79%	84%	85%
Efficiency	230VAC(190-260VAC)		
Peak Efficiency	82%	87%	89%
Stable Efficiency	80%	85%	85%
Protection	Islanding; Short-circuit; Low Voltage; Over Voltage; Over Temperature Protection		
Working Temperature	-25°C-70°C		
Working Humidity	0%~90%RH non-condensing		
Waterproof	Indoor design		
Show	Luminous Diode(LED)		
Cooling	Fan		
Stand-by Power	<1W		
EMC	EN61000-6-3:2007 EN61000-6-1:2007		
Grid Disturbance	EN 50178+EN 62109-1+VDE0126-1-12		
Grid Detection	DIN VDE 1026 UL1741		

Tabla 12. Datos eléctricos de microinversor SolarEpic de 1000W.

#### 4.2.2 Inclinación de panel solar.

Para San Salvador la latitud es de 13.7°, calculamos la inclinación óptima para los paneles solares.

$$S_{\text{óptima}} = 3.7 + 0.69|\varphi| = 3.7 + 0.69 * |13.7|$$

$$S_{\text{óptima}} = 13.15^{\circ}$$

Por lo tanto, el panel solar estará orientado al sur con una inclinación de 13°

### 4.3 Estructura de soporte del panel bifacial.

Como se ha visto, en el comercio de la energía solar hay una gran variedad de fabricantes de estructuras para el montaje de los módulos monofaciales, las cuales se adaptan según la necesidad y superficie en el que será instalado, habiendo así para montaje sobre techo, en paredes, postes, así como en plafón y en tierra. Algunos ejemplos de estos se observan en la siguiente figura.



*Figura 66. Estructura de soporte para modulo monofacial.*

Para las pruebas que se realizarán a los módulos convencionales que se tienen en la escuela de eléctrica de la Universidad de El Salvador se buscará un modelo que se adapte al suelo del sitio de las pruebas buscando un ángulo de inclinación.

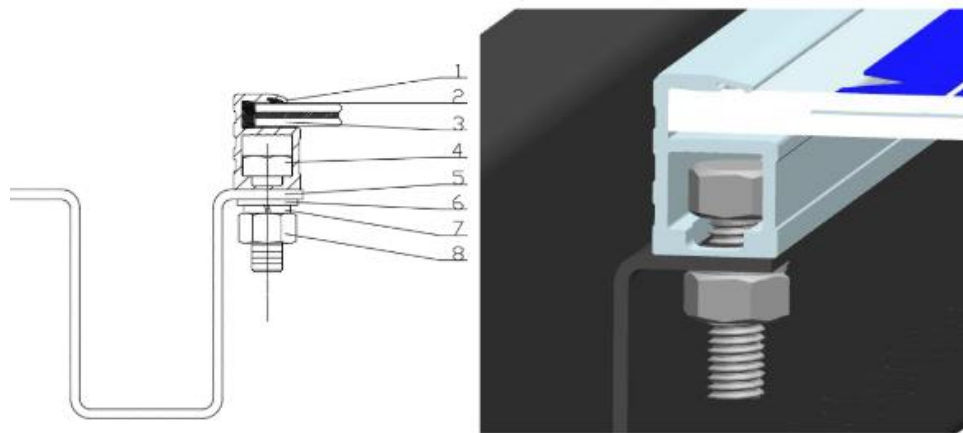
Como se menciona en los capítulos anteriores, hay distintos diseños de estructuras de montaje para módulos bifaciales, según su fabricante, como las que se observan a continuación.



*Figura 66. Estructura de soporte con marco para modulo bifacial.*

Para la colocación, realización de prueba y toma de datos del módulo bifacial, se propone una estructura que nos permita colocar el módulo sin tener muchos generadores de

sombra, por lo tanto, estaría formada de un marco en el que irá fijado el módulo bifacial, similar como se muestra en la Figura 67.

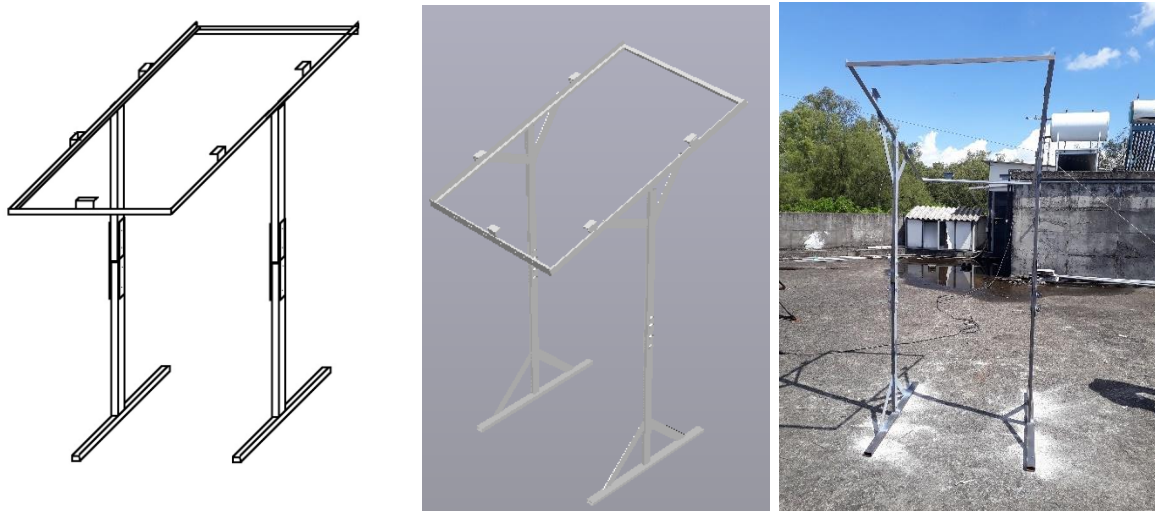


*Figura 67. Estructura de soporte con marco para módulo bifacial.*

Tomando del manual de usuario de Trina solar, para módulos fotovoltaicos tipo Duomax Twin, según la figura anterior los componentes son:

1. Marco de aluminio.
2. Sellador.
3. Módulo.
4. Perno hexagonal M8.
5. Guía.
6. Arandela plana.
7. Arandela de resorte.
8. Tuerca hexagonal.

Adaptando para la estructura de soporte que se propone para las pruebas se tiene el siguiente diseño como se muestra en la Figura 68.



*Figura 68. Estructura de soporte propuesta para modulo bifacial.*

Este modelo de estructura permitirá poder hacer pruebas al módulo bifacial en distintas alturas con un ángulo de  $13^\circ$ , de esta manera comparar las producciones de energía en las alturas de 1m y de 2m, para obtener datos de producción con diferente albedo.

## **Capítulo 5. Comparación de la producción fotovoltaica monofacial con la producción bifacial.**

### **5.1 Comparación de la producción.**

Para comparar la producción que se podría obtener de nuestro panel bifacial, se tomó los datos de las mediciones realizadas al panel, instalado a la altura de 1 metro y luego a 2 metros. Las mediciones se hicieron sobre superficies de distintos colores que proporcionan albedos diferentes, usando los colores naturales del concreto, blanco, verde, café y negro. Tomando las mediciones un día a la altura de 1 metro sobre un color de superficie de los anteriormente mencionados y el siguiente día a la altura de 2 metros siempre sobre el mismo color de superficie y así sucesivamente con cada color de superficie.

Estas mediciones se hicieron con la finalidad de observar el comportamiento de la potencia producida por el panel fotovoltaico, de esta forma identificar en que superficie hay mayor eficiencia y por ende mayor producción de potencia. Se comparan los datos de lo que produciría un panel monofacial y un panel bifacial bajo las mismas condiciones ambientales para ver su eficiencia.

Los resultados de las mediciones se muestran a continuación en las siguientes tablas y gráficas.

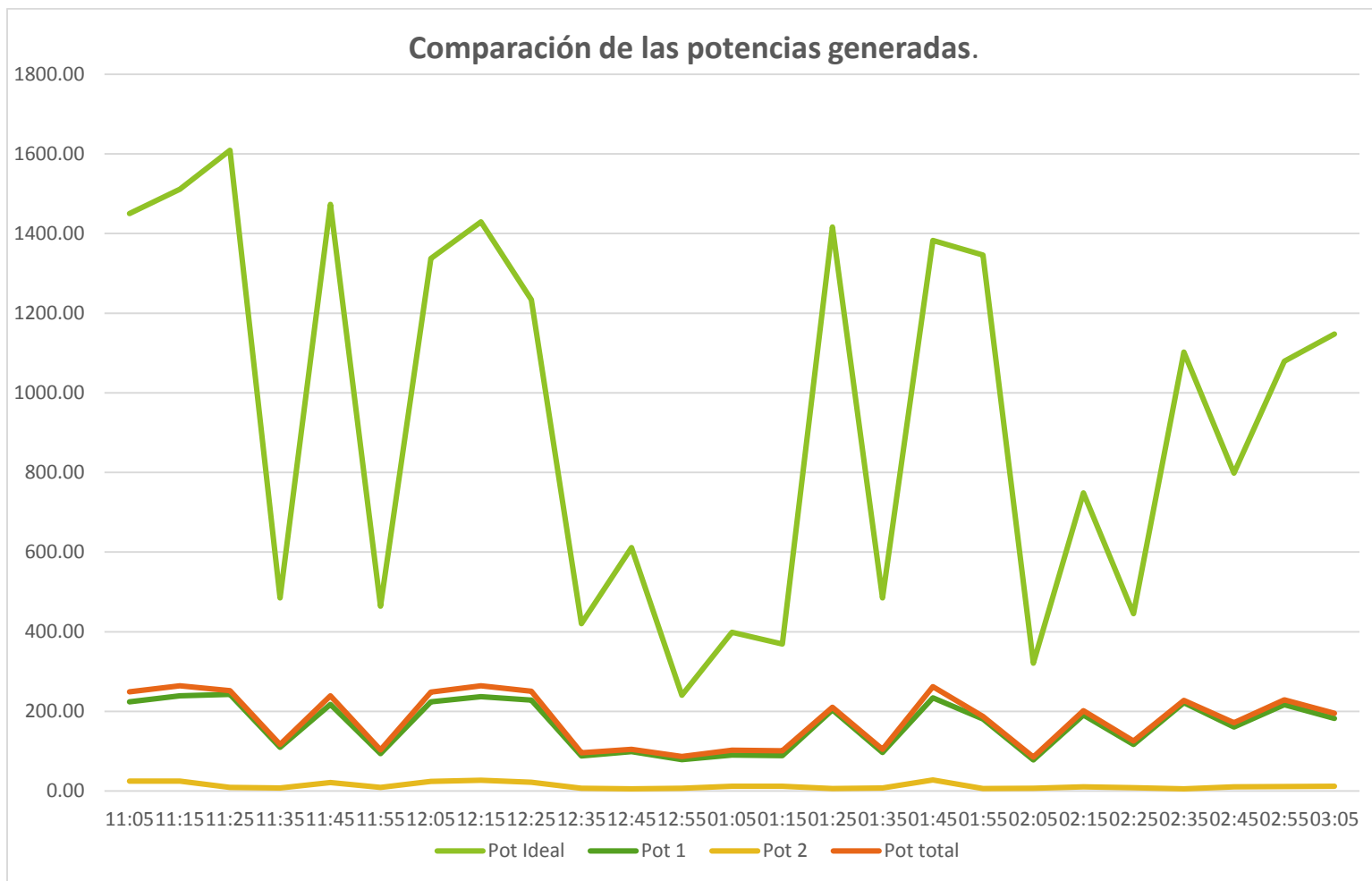
**5.1.1 Sobre superficie de concreto a 2 metros de altura con albedo de 0.30.**



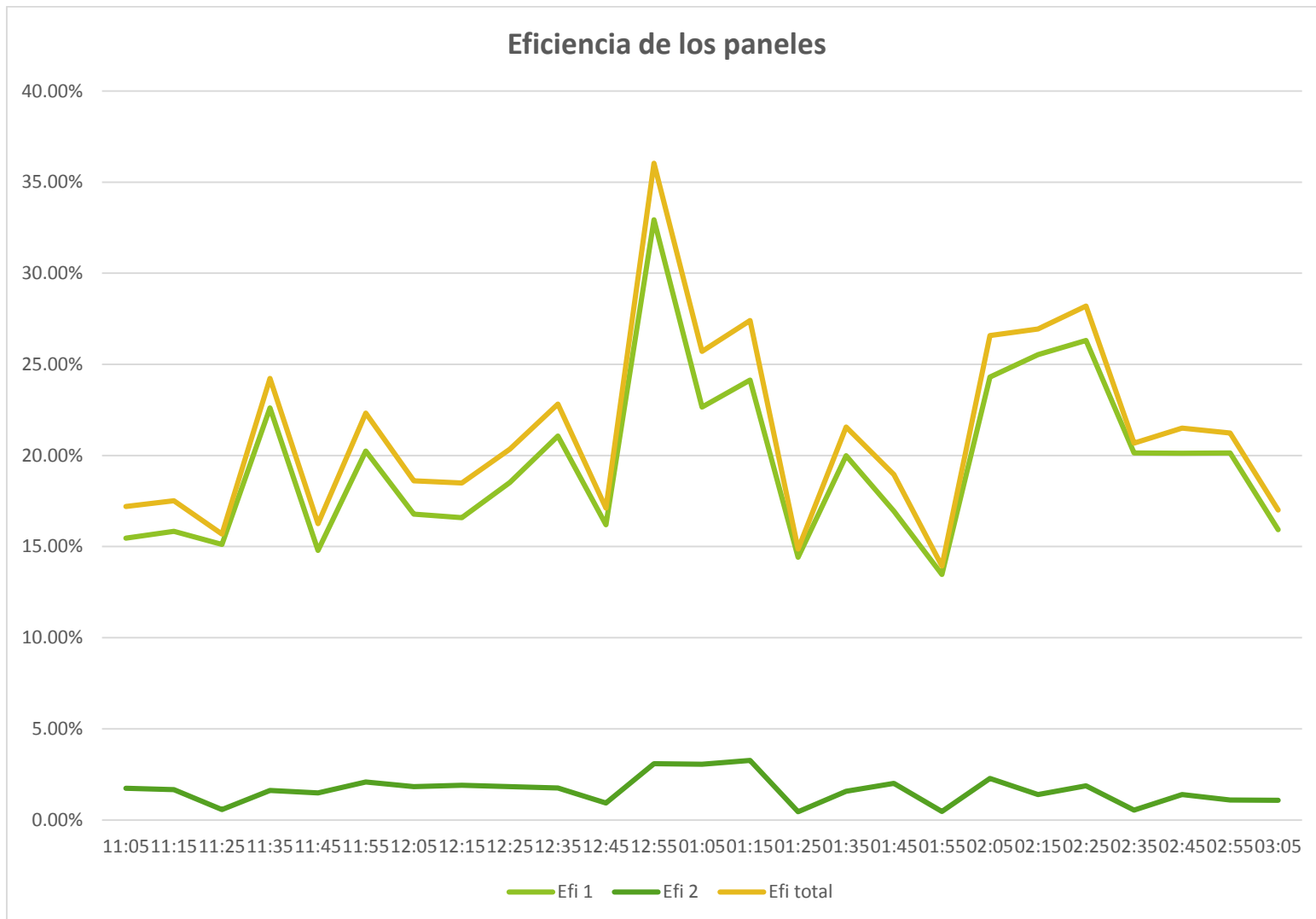
*Figura 69. Foto de la superficie de concreto a la altura de 2m.*

Mediciones cada 10 minutos del día 14 de junio															
Mediciones en el intervalo de 11:05 am a 3:05 pm						Albedo = 0.30 Altura = 2m Superficie: concreto									
No°	Irr Pv	Irr Pir G	Irr Pir direc	Vl pv	I1	I2	It	Hora	Pot Ideal	Pot 1	Pot 2	Pot total	Efi 1	Efi 2	Efi total
1	993	993	11.0	25.2	8.9	1.0	9.9	11:05	1449.78	224.28	25.20	249.48	15.47%	1.74%	17.21%
2	1035	1028	11.0	25.2	9.5	1.0	10.5	11:15	1511.10	239.40	25.20	264.60	15.84%	1.67%	17.51%
3	1102	1083	11.6	30.4	8.0	0.3	8.3	11:25	1608.92	243.20	9.12	252.32	15.12%	0.57%	15.68%
4	332	300	3.9	26.1	4.2	0.3	4.5	11:35	484.72	109.62	7.83	117.45	22.62%	1.62%	24.23%
5	1009	990	10.0	24.2	9.0	0.9	9.9	11:45	1473.14	217.80	21.78	239.58	14.78%	1.48%	16.26%
6	318	408	3.4	24.1	3.9	0.4	4.3	11:55	464.28	93.99	9.64	103.63	20.24%	2.08%	22.32%
7	916	963	9.8	24.4	9.2	1.0	10.2	12:05	1337.36	224.48	24.40	248.88	16.79%	1.82%	18.61%
8	979	1045	10.4	24.7	9.6	1.1	10.7	12:15	1429.34	237.12	27.17	264.29	16.59%	1.90%	18.49%
9	845	894	9.0	25.1	9.1	0.9	10.0	12:25	1233.70	228.41	22.59	251.00	18.51%	1.83%	20.35%
10	288	301	3.0	24.6	3.6	0.3	3.9	12:35	420.48	88.56	7.38	95.94	21.06%	1.76%	22.82%
11	419	431	5.0	28.3	3.5	0.2	3.7	12:45	611.74	99.05	5.66	104.71	16.19%	0.93%	17.12%
12	165	125	2.0	24.8	3.2	0.3	3.5	12:55	240.90	79.36	7.44	86.80	32.94%	3.09%	36.03%
13	273	271	2.9	24.4	3.7	0.5	4.2	1:05	398.58	90.28	12.20	102.48	22.65%	3.06%	25.71%
14	253	215	2.9	24.1	3.7	0.5	4.2	1:15	369.38	89.17	12.05	101.22	24.14%	3.26%	27.40%
15	970	999	10.1	32.4	6.3	0.2	6.5	1:25	1416.20	204.12	6.48	210.60	14.41%	0.46%	14.87%
16	332	370	3.4	25.5	3.8	0.3	4.1	1:35	484.72	96.90	7.65	104.55	19.99%	1.58%	21.57%
17	947	958	10.1	25.2	9.3	1.1	10.4	1:45	1382.62	234.36	27.72	262.08	16.95%	2.00%	18.96%
18	922	912	10.0	31.8	5.7	0.2	5.9	1:55	1346.12	181.26	6.36	187.62	13.47%	0.47%	13.94%
19	220	231	2.4	24.4	3.2	0.3	3.5	2:05	321.20	78.08	7.32	85.40	24.31%	2.28%	26.59%
20	513	544	5.7	26.2	7.3	0.4	7.7	2:15	748.98	191.26	10.48	201.74	25.54%	1.40%	26.94%
21	305	299	3.5	27.9	4.2	0.3	4.5	2:25	445.30	117.18	8.37	125.55	26.31%	1.88%	28.19%
22	755	766	8.0	29.6	7.5	0.2	7.7	2:35	1102.30	222.00	5.92	227.92	20.14%	0.54%	20.68%
23	547	594	5.3	27.7	5.8	0.4	6.2	2:45	798.62	160.66	11.08	171.74	20.12%	1.39%	21.50%
24	739	763	7.8	29.4	7.4	0.4	7.8	2:55	1078.94	217.34	11.75	229.09	20.14%	1.09%	21.23%
25	786	806	8.3	24.7	7.4	0.5	7.9	3:05	1147.56	182.78	12.35	195.13	15.93%	1.08%	17.00%
<b>Promedio</b>	<b>638.52</b>	<b>651.56</b>	<b>6.82</b>	<b>26.41</b>	<b>6.28</b>	<b>0.52</b>	<b>6.80</b>	--	<b>932.24</b>	<b>166.03</b>	<b>13.33</b>	<b>179.35</b>	<b>19.61%</b>	<b>1.64%</b>	<b>21.25%</b>
<b>Maximo</b>	<b>1102</b>	<b>1083</b>	<b>11.6</b>	<b>32.4</b>	<b>9.6</b>	<b>1.1</b>	<b>10.7</b>	--	<b>1608.92</b>	<b>243.20</b>	<b>27.72</b>	<b>264.60</b>	<b>32.94%</b>	<b>3.26%</b>	<b>36.03%</b>
<b>Minimo</b>	<b>165</b>	<b>125</b>	<b>2.0</b>	<b>24.1</b>	<b>3.2</b>	<b>0.2</b>	<b>3.5</b>	--	<b>240.90</b>	<b>78.08</b>	<b>5.66</b>	<b>85.40</b>	<b>13.47%</b>	<b>0.46%</b>	<b>13.94%</b>

Tabla 13. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 2m en superficie de concreto.



*Gráfico 2. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos en superficie de concreto.*



*Gráfico 3. Eficiencias generadas por los paneles a 2m del suelo con superficie de concreto.*

**5.1.2 Sobre superficie de concreto a 1 metros de altura con albedo de 0.30.**



*Figura 70. Foto de la superficie de concreto a la altura de 1m.*

## Mediciones cada 10 minutos del día 15 de junio

Mediciones en el intervalo de 10:50 am a 1:30 pm					Albedo = 0.30 Altura = 1m Superficie: concreto										
No°	Irr Pv	Irr Pir G	Irr Pir direc	Vl pv	I1	I2	It	Hora	Pot Ideal	Pot 1	Pot 2	Pot total	Efi 1	Efi 2	Efi total
1	1052	1098	10.5	24.9	10.1	0.6	10.7	10:50	1535.92	251.49	14.94	266.43	16.37%	0.97%	17.35%
2	1148	1190	11.6	24.9	10.2	0.7	10.9	11:00	1676.08	253.98	17.43	271.41	15.15%	1.04%	16.19%
3	913	971	9.4	30.4	6.4	0.6	7.0	11:10	1332.98	194.56	18.24	212.80	14.60%	1.37%	15.96%
4	257	283	2.4	25.1	3.0	0.2	3.2	11:20	375.22	75.30	5.02	80.32	20.07%	1.34%	21.41%
5	731	790	6.9	25.7	9.5	0.7	10.2	11:30	1067.26	244.15	17.99	262.14	22.88%	1.69%	24.56%
6	368	446	3.0	26.4	3.2	0.3	3.5	11:40	537.28	84.48	7.92	92.40	15.72%	1.47%	17.20%
7	771	977	7.7	30.2	4.2	0.5	4.7	11:50	1125.66	126.84	15.10	141.94	11.27%	1.34%	12.61%
8	214	263	2.3	25.9	3.5	0.3	3.8	12:00	312.44	90.65	7.77	98.42	29.01%	2.49%	31.50%
9	179	208	2.0	25.9	3.2	0.2	3.4	12:10	261.34	82.88	5.18	88.06	31.71%	1.98%	33.70%
10	243	256	2.2	25.0	3.7	0.2	3.9	12:20	354.78	92.50	5.00	97.50	26.07%	1.41%	27.48%
11	192	204	2.0	32.1	2.7	0.3	3.0	12:30	280.32	86.67	9.63	96.30	30.92%	3.44%	34.35%
12	1106	1150	11.0	32.0	6.6	0.4	7.0	12:40	1614.76	211.20	12.80	224.00	13.08%	0.79%	13.87%
13	333	406	3.6	29.9	5.6	0.3	5.9	12:50	486.18	167.44	8.97	176.41	34.44%	1.84%	36.28%
14	279	373	3.2	25.1	2.2	0.3	2.5	1:00	407.34	55.22	7.53	62.75	13.56%	1.85%	15.40%
15	193	265	2.2	24.8	3.6	0.4	4.0	1:10	281.78	89.28	9.92	99.20	31.68%	3.52%	35.20%
16	711	788	7.1	32.7	5.2	0.2	5.4	1:20	1038.06	170.04	6.54	176.58	16.38%	0.63%	17.01%
17	765	815	7.4	31.3	4.2	0.5	4.7	1:30	1116.90	131.46	15.65	147.11	11.77%	1.40%	13.17%
<b>Promedio</b>	<b>556.18</b>	<b>616.65</b>	<b>5.6</b>	<b>27.8</b>	<b>5.1</b>	<b>0.4</b>	<b>5.5</b>	--	<b>812.02</b>	<b>141.66</b>	<b>10.92</b>	<b>152.57</b>	<b>20.86%</b>	<b>1.68%</b>	<b>22.54%</b>
<b>Maximo</b>	<b>1148</b>	<b>1190</b>	<b>11.6</b>	<b>32.7</b>	<b>10.2</b>	<b>0.7</b>	<b>10.9</b>	--	<b>1676.08</b>	<b>253.98</b>	<b>18.24</b>	<b>271.41</b>	<b>34.44%</b>	<b>3.52%</b>	<b>36.28%</b>
<b>Minimo</b>	<b>179</b>	<b>204</b>	<b>2.0</b>	<b>24.8</b>	<b>2.2</b>	<b>0.2</b>	<b>2.5</b>	--	<b>261.34</b>	<b>55.22</b>	<b>5.00</b>	<b>62.75</b>	<b>11.27%</b>	<b>0.63%</b>	<b>12.61%</b>

*Tabla 14. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 1m en superficie de concreto.*

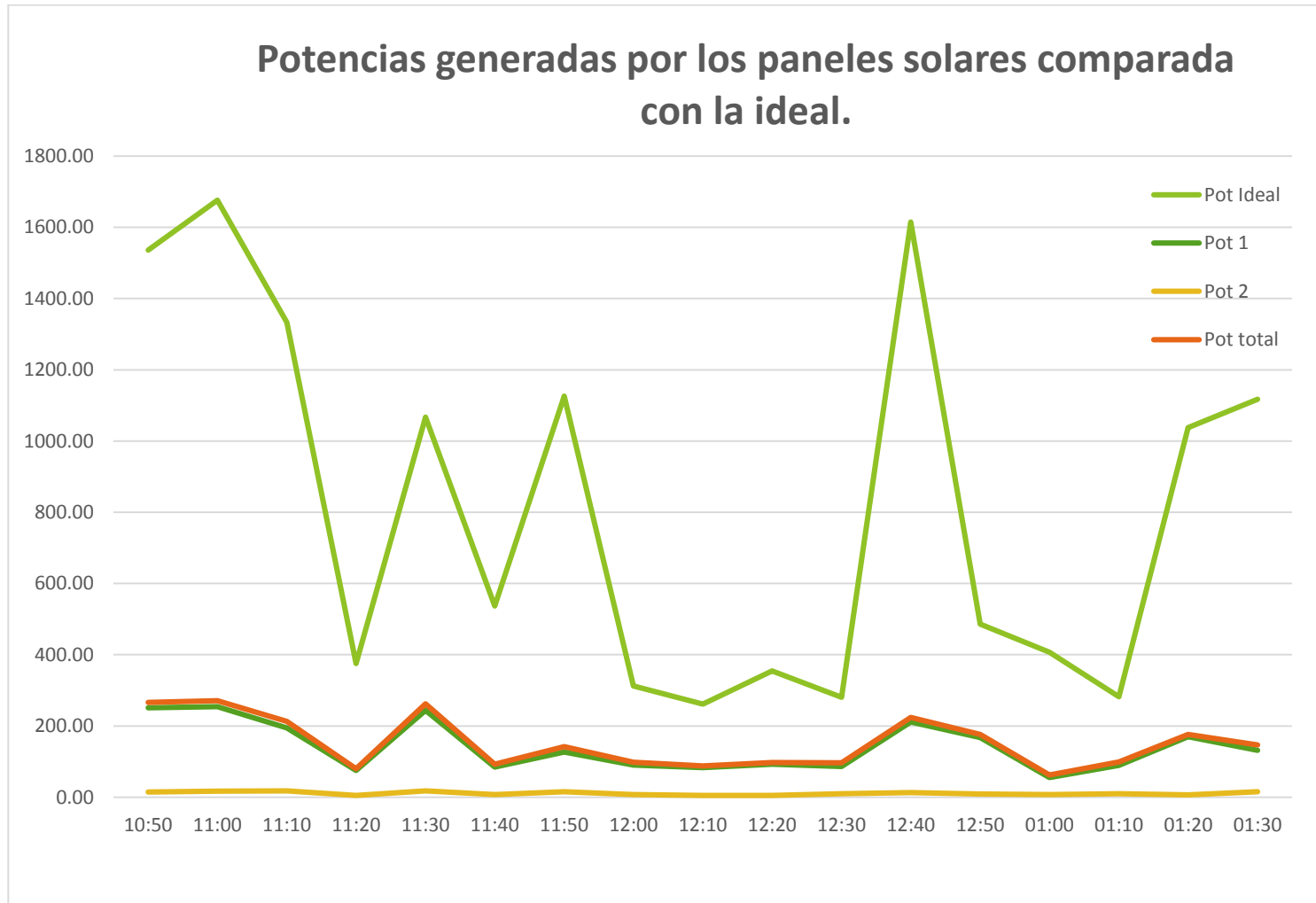
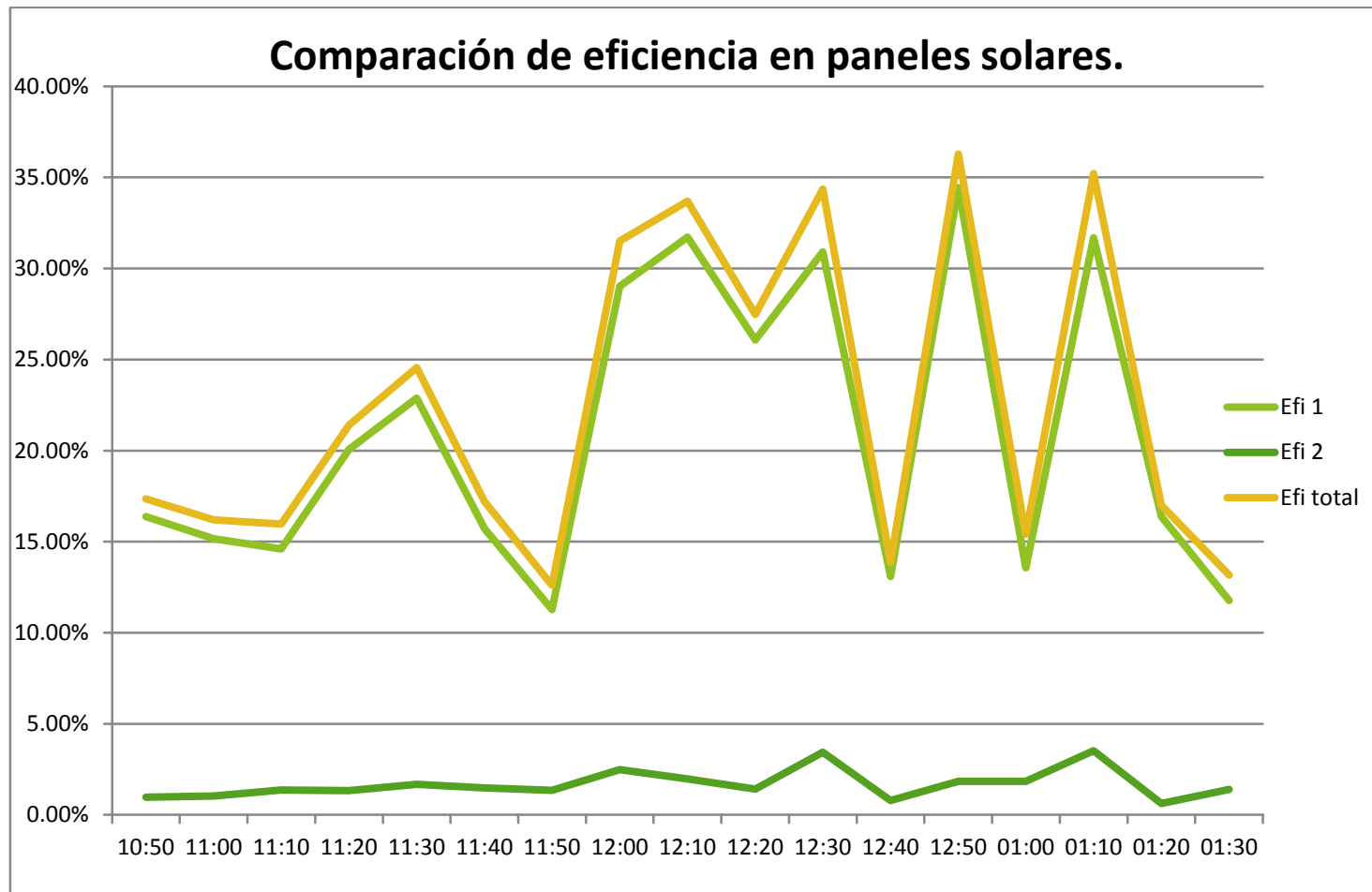


Gráfico 4. Potencias generadas por los paneles a una altura de 1m con superficie de concreto.



*Gráfico 5. Eficiencias generadas por los paneles a 1m del suelo en concreto.*

**5.1.3 Sobre superficie blanca a 1 metros de altura con albedo de 0.80.**



*Figura 71. Foto de la superficie de concreto pintado de blanco a la altura de 1m.*

## Mediciones cada 10 minutos del día 21 de junio

Mediciones en el intervalo de 11:25 am a 3:15 pm					Albedo = 0.80 Altura = 1m Superficie: Blanca										
No°	Irr Pv	Irr Pir G	Irr Pir direc	Vl pv	I1	I2	It	Hora	Pot Ideal	Pot 1	Pot 2	Pot total	Efi 1	Efi 2	Efi total
1	990	1021	10	25.4	8.4	1.8	10.2	11:25	1445.40	213.36	45.72	259.08	14.76%	3.16%	17.92%
2	1039	970	11	30	5.6	1.3	6.9	11:35	1516.94	168.00	39.00	207.00	11.07%	2.57%	13.65%
3	998	1008	10	23.8	7.4	2.6	10.0	11:45	1457.08	176.12	61.88	238.00	12.09%	4.25%	16.33%
4	1048	920	9.9	33.7	8.9	1.9	10.8	11:55	1530.08	299.93	64.03	363.96	19.60%	4.18%	23.79%
5	1023	1035	11	28.5	8.8	1.5	10.3	12:05	1493.58	250.80	42.75	293.55	16.79%	2.86%	19.65%
6	1061	1080	11	23.9	9	2.1	11.1	12:15	1549.06	215.10	50.19	265.29	13.89%	3.24%	17.13%
7	1122	1102	12	23.8	9.4	2.1	11.5	12:25	1638.12	223.72	49.98	273.70	13.66%	3.05%	16.71%
8	689	697	6	30	4.7	0.5	5.2	12:35	1005.94	141.00	15.00	156.00	14.02%	1.49%	15.51%
9	1087	1096	11	28.2	9.2	1.9	11.1	12:45	1587.02	259.44	53.58	313.02	16.35%	3.38%	19.72%
10	1123	1113	12	29.9	8.8	2.4	11.2	12:55	1639.58	263.12	71.76	334.88	16.05%	4.38%	20.42%
11	1073	1036	11	30.7	8.3	1.4	9.7	13:05	1566.58	254.81	42.98	297.79	16.27%	2.74%	19.01%
12	684	700	6	25.2	5.3	0.7	6.0	13:15	998.64	133.56	17.64	151.20	13.37%	1.77%	15.14%
13	222	219	3	27.7	1.8	0.3	2.1	13:25	324.12	49.86	8.31	58.17	15.38%	2.56%	17.95%
14	338	339	4	30.6	2.8	0.3	3.1	13:35	493.48	85.68	9.18	94.86	17.36%	1.86%	19.22%
15	200	195	2	24.2	1.6	0.4	2.0	13:45	292.00	38.72	9.68	48.40	13.26%	3.32%	16.58%
16	950	930	10	32.9	7.6	0.8	8.4	13:55	1387.00	250.04	26.32	276.36	18.03%	1.90%	19.93%
17	862	901	8	32.1	6.5	1.8	8.3	14:05	1258.52	208.65	57.78	266.43	16.58%	4.59%	21.17%
18	850	879	9	24.5	6.9	1.9	8.8	14:15	1241.00	169.05	46.55	215.60	13.62%	3.75%	17.37%
19	838	812	9	24.3	6.5	1.7	8.2	14:25	1223.48	157.95	41.31	199.26	12.91%	3.38%	16.29%
20	829	899	9	30.5	5.7	1.7	7.4	14:35	1210.34	173.85	51.85	225.70	14.36%	4.28%	18.65%
21	764	738	8	23.1	6	1.6	7.6	14:45	1115.44	138.60	36.96	175.56	12.43%	3.31%	15.74%
22	706	679	7	23.3	5.4	1.8	7.2	14:55	1030.76	125.82	41.94	167.76	12.21%	4.07%	16.28%
23	682	655	6.3	25.9	5.3	1.2	6.5	15:05	995.72	137.27	31.08	168.35	13.79%	3.12%	16.91%
24	661	625	7	23	5	1.6	6.6	15:15	965.06	115.00	36.80	151.80	11.92%	3.81%	15.73%
<b>Promedio</b>	<b>826.63</b>	<b>818.71</b>	<b>8.47</b>	<b>27.30</b>	<b>6.45</b>	<b>1.47</b>	<b>7.93</b>	<b>--</b>	<b>1206.87</b>	<b>177.06</b>	<b>39.68</b>	<b>216.74</b>	<b>14.57%</b>	<b>3.21%</b>	<b>17.78%</b>
<b>Maximo</b>	<b>1123</b>	<b>1113</b>	<b>12.0</b>	<b>33.7</b>	<b>9.4</b>	<b>2.6</b>	<b>11.5</b>	<b>--</b>	<b>1639.58</b>	<b>299.93</b>	<b>71.76</b>	<b>363.96</b>	<b>19.60%</b>	<b>4.59%</b>	<b>23.79%</b>
<b>Minimo</b>	<b>200</b>	<b>195</b>	<b>2.0</b>	<b>23.0</b>	<b>1.6</b>	<b>0.3</b>	<b>2.0</b>	<b>--</b>	<b>292.00</b>	<b>38.72</b>	<b>8.31</b>	<b>48.40</b>	<b>11.07%</b>	<b>1.49%</b>	<b>13.65%</b>

*Tabla 15. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 1m en superficie blanca.*

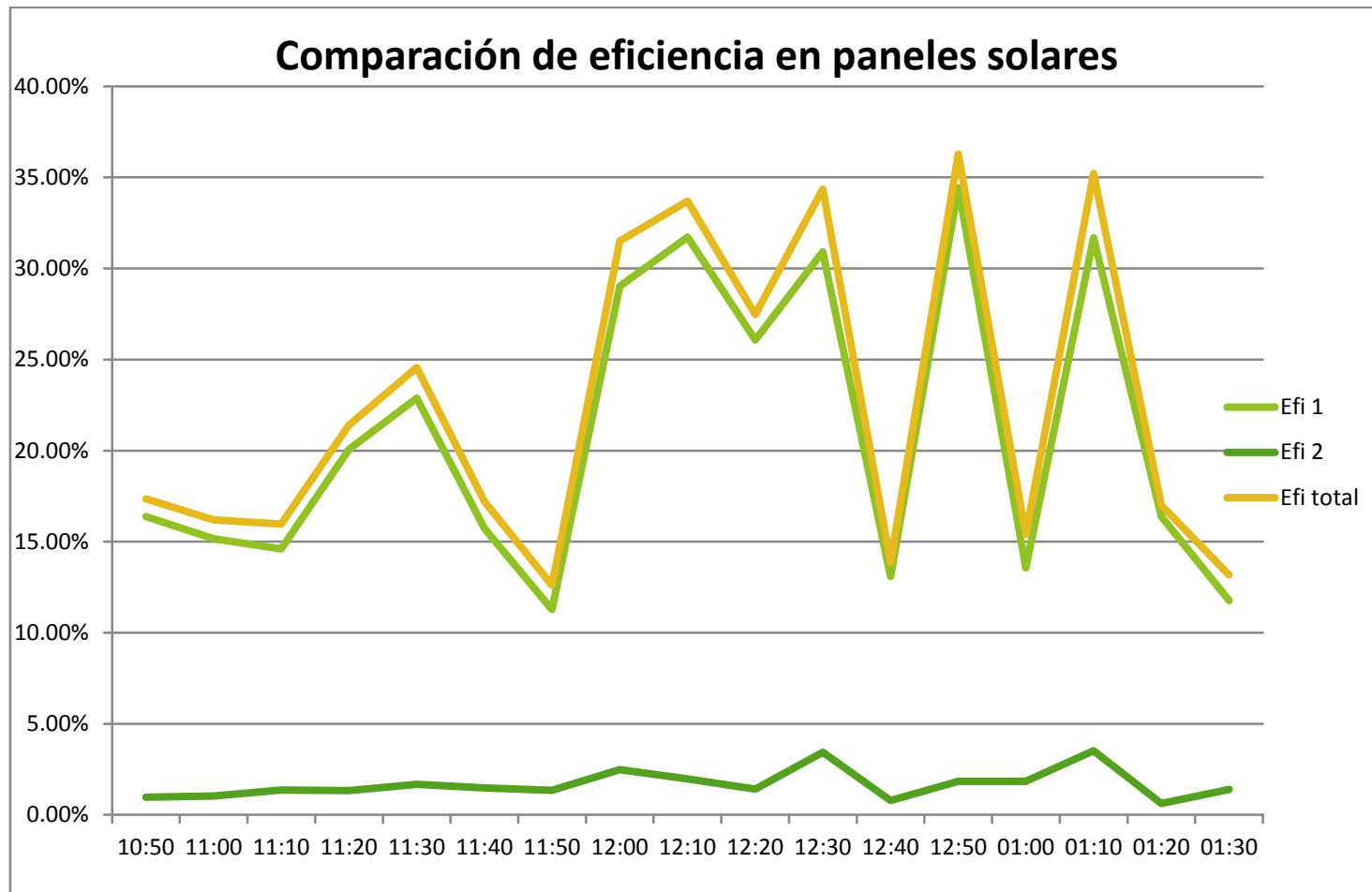
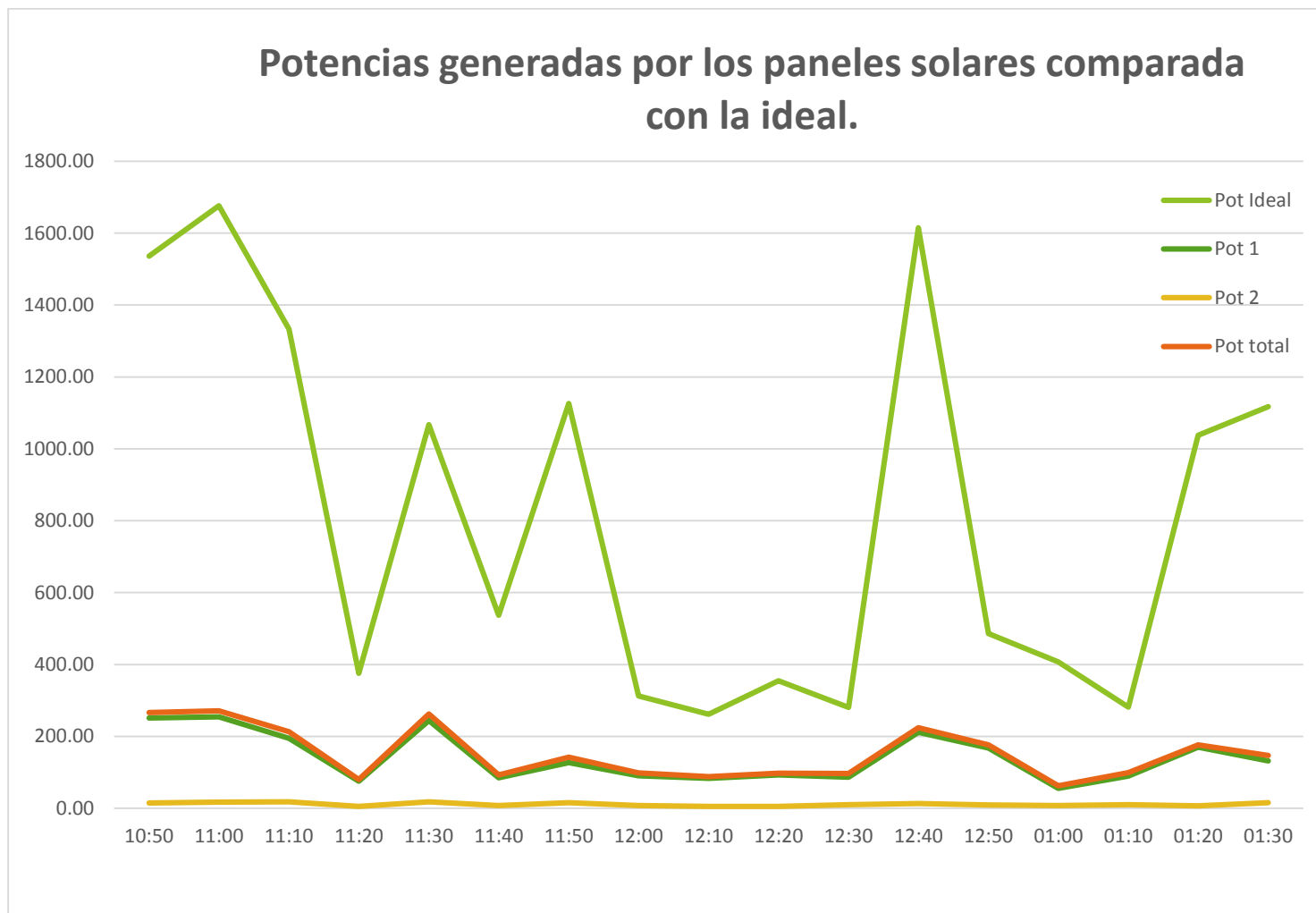


Gráfico 6. Eficiencias generadas por los paneles a 1m del suelo blanco.



*Gráfico 7. Potencias generadas por los paneles en superficie blanca a 1m del suelo.*

**5.1.4 Sobre superficie blanca a 2 metros de altura con albedo de 0.80.**



*Figura 72. Foto de la superficie de concreto pintado de blanco a la altura de 2m.*

Mediciones cada 10 minutos del día 22 de junio															
Mediciones en el intervalo de 10:35 am a 2:55 pm					Albedo = 0.80 Altura= 2m Superficie: Blanca										
No°	Irr Pir G	Irr reflejada	Irr Pir direc	Vlppv	I1	I2	It	Hora	Pot Ideal	Pot 1	Pot 2	Pot total	Efi 1	Efi 2	Efi total
1	1121	2	10.7	30.3	8.7	1.9	10.6	10:35	1636.66	263.61	57.57	321.18	16.11%	3.52%	19.62%
2	997	2	8.8	25.5	8.1	2.1	10.2	10:45	1455.62	206.55	53.55	260.10	14.19%	3.68%	17.87%
3	641	1	7.0	30.5	4.6	1.1	5.7	10:55	935.86	140.30	33.55	173.85	14.99%	3.58%	18.58%
4	628	2	7.0	25.2	4.8	1.1	5.9	11:05	916.88	120.96	27.72	148.68	13.19%	3.02%	16.22%
5	359	1	3.0	25.1	3.6	1.1	4.7	11:15	524.14	90.36	27.61	117.97	17.24%	5.27%	22.51%
6	329	1	4.0	24.6	3.3	1.3	4.6	11:25	480.34	81.18	31.98	113.16	16.90%	6.66%	23.56%
7	292	1	4.0	24.8	3.0	0.9	3.9	11:35	426.32	74.40	22.32	96.72	17.45%	5.24%	22.69%
8	333	1	4.0	25.0	3.4	1.2	4.6	11:45	486.18	85.00	30.00	115.00	17.48%	6.17%	23.65%
9	223	1	3.0	24.9	2.4	0.4	2.8	11:55	325.58	59.76	9.96	69.72	18.35%	3.06%	21.41%
10	173	1	2.0	31.9	1.6	0.4	2.0	12:05	252.58	51.04	12.76	63.80	20.21%	5.05%	25.26%
11	132	0	2.0	24.7	1.5	0.4	1.9	12:15	192.72	37.05	9.88	46.93	19.22%	5.13%	24.35%
12	474	1	4.2	29.9	3.6	1.1	4.7	12:25	692.04	107.64	32.89	140.53	15.55%	4.75%	20.31%
13	1115	3	11.0	27.1	8.3	2.0	10.3	12:35	1627.90	224.93	54.20	279.13	13.82%	3.33%	17.15%
14	972	2	10.0	25.9	7.7	1.8	9.5	12:45	1419.12	199.43	46.62	246.05	14.05%	3.29%	17.34%
15	966	2	10.0	26.1	7.5	1.9	9.4	12:55	1410.36	195.75	49.59	245.34	13.88%	3.52%	17.40%
16	1022	2	11.0	27.1	7.4	1.9	9.3	1:05	1492.12	200.54	51.49	252.03	13.44%	3.45%	16.89%
17	1137	2	12.0	31.6	8.2	2.0	10.2	1:15	1660.02	259.12	63.20	322.32	15.61%	3.81%	19.42%
18	839	3	8.0	28.6	7.0	1.9	8.9	1:25	1224.94	200.20	54.34	254.54	16.34%	4.44%	20.78%
19	391	1	4.0	25.9	2.9	0.8	3.7	1:35	570.86	75.11	20.72	95.83	13.16%	3.63%	16.79%
20	163	1	2.0	24.5	1.7	0.4	2.1	1:45	237.98	41.65	9.80	51.45	17.50%	4.12%	21.62%
21	900	3	9.0	30.1	7.3	1.9	9.2	1:55	1314.00	219.73	57.19	276.92	16.72%	4.35%	21.07%
22	868	3	9.0	25.0	7.1	1.9	9.0	2:05	1267.28	177.50	47.50	225.00	14.01%	3.75%	17.75%
23	939	3	10.0	25.4	7.6	2.0	9.6	2:15	1370.94	193.04	50.80	243.84	14.08%	3.71%	17.79%
24	415	2	5.0	24.4	3.0	0.5	3.5	2:25	605.90	73.20	12.20	85.40	12.08%	2.01%	14.09%
25	233	1	2.0	28.6	2.4	0.4	2.8	2:35	340.18	68.64	11.44	80.08	20.18%	3.36%	23.54%
26	762	2	8.0	24.4	6.3	1.6	7.9	2:45	1112.52	153.72	39.04	192.76	13.82%	3.51%	17.33%
27	955	3	10.0	30.1	7.5	2.0	9.5	2:55	1394.30	225.75	60.20	285.95	16.19%	4.32%	20.51%
Promedio	643.67	1.74	6.7	26.9	5.2	1.3	6.5	--	939.75	141.71	36.23	177.94	15.77%	4.06%	19.83%
Maximo	1137	3	12.0	31.9	8.7	2.1	10.6	--	1660.02	263.61	63.20	322.32	20.21%	6.66%	25.26%
Minimo	132	0	2.0	24.4	1.5	0.4	1.9	--	192.72	37.05	9.80	46.93	12.08%	2.01%	14.09%

Tabla 16. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 2m en superficie blanca.

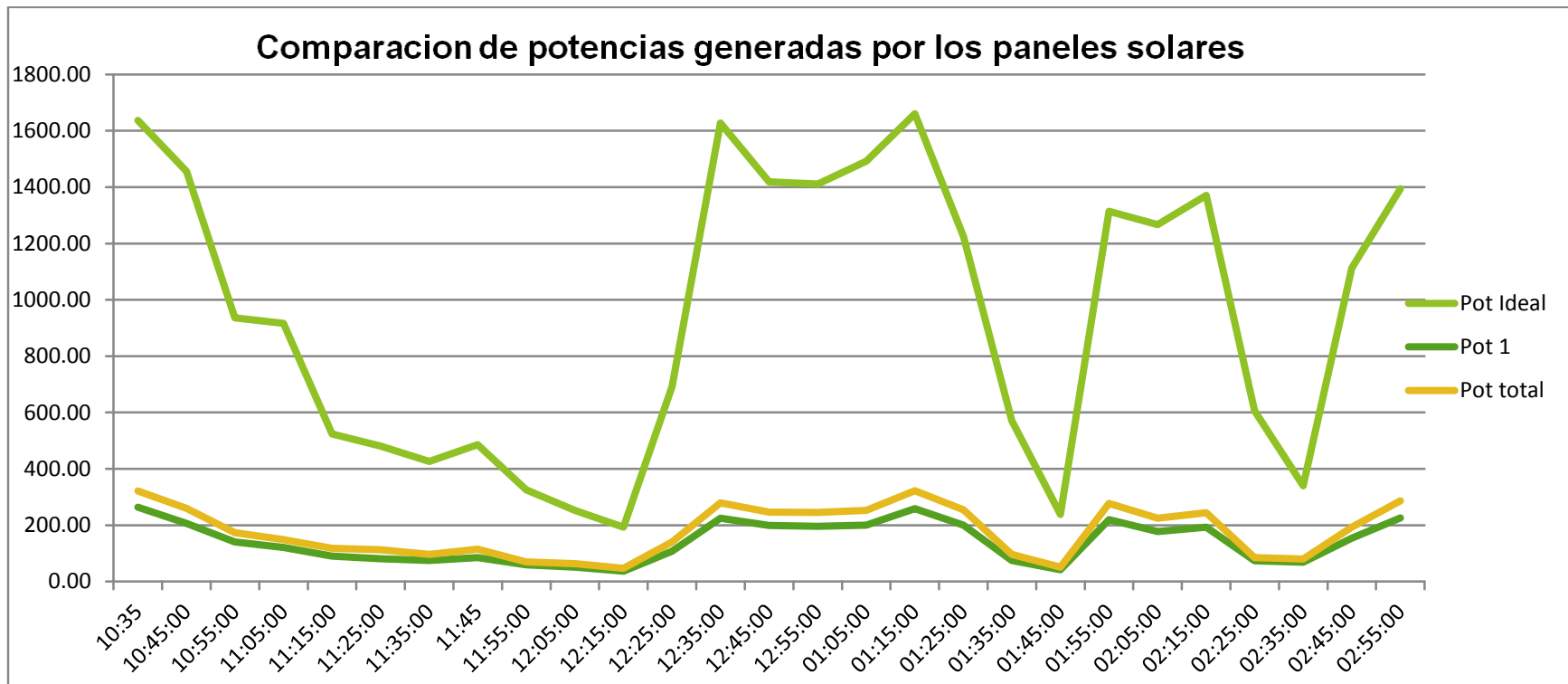


Gráfico 8. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos a 2m en suelo blanco.

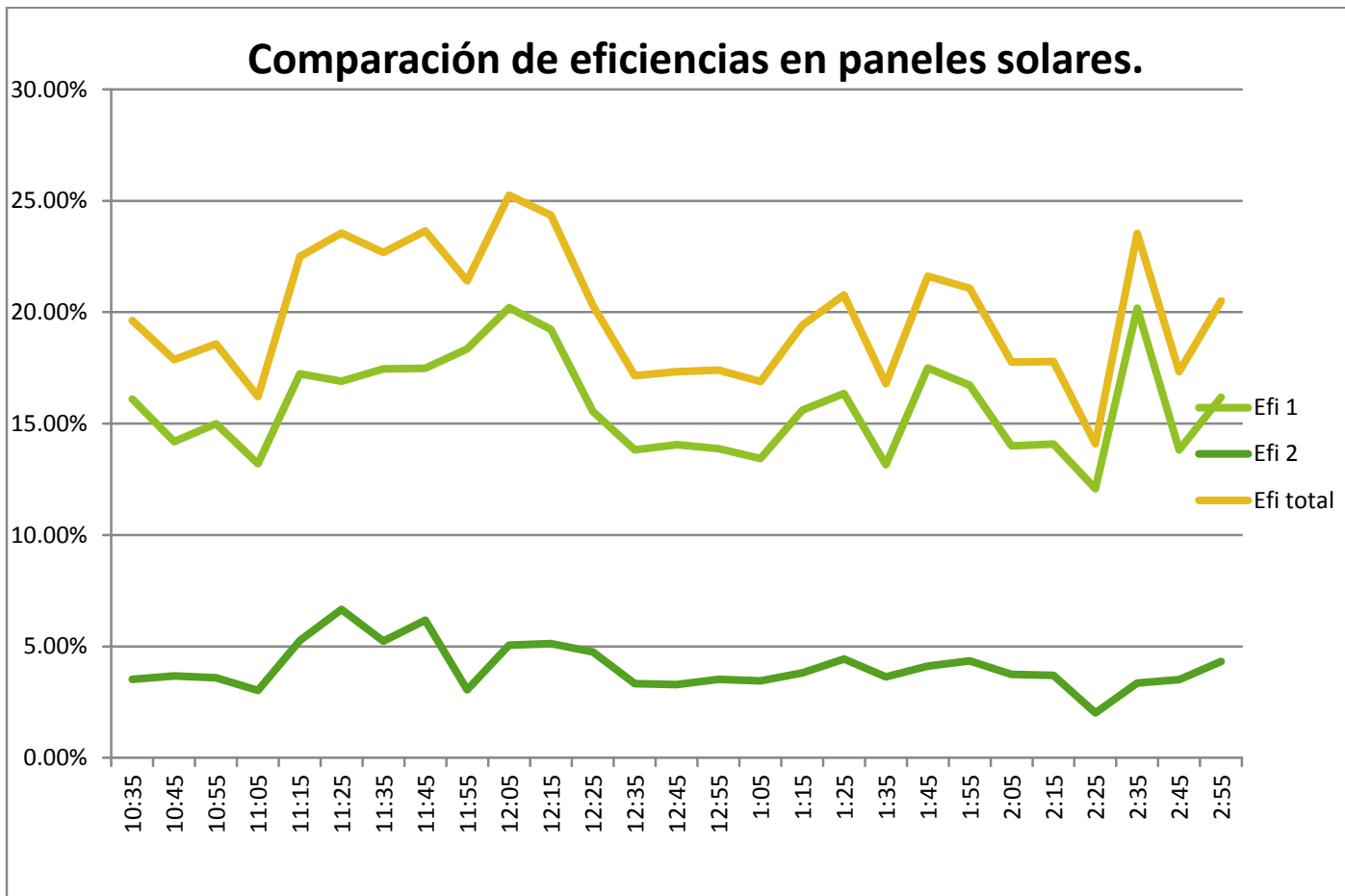


Gráfico 9. Eficiencias generadas por los paneles a 2m del suelo blanco.

**5.1.5 Sobre superficie verde a 2 metros de altura con albedo de 0.16.**



*Figura 73. Foto de la superficie de concreto pintado de verde a la altura de 2m.*

Mediciones cada 10 minutos del día 24 de junio															
Mediciones en el intervalo de 10:25 am a 2:55 pm					Albedo = 0.16 Altura = 2m Superficie: Verde										
No°	Irr Pir G	Irr reflejada	Irr Pir direc	Vl pv	I1	I2	It	Hora	Pot Ideal	Pot 1	Pot 2	Pot total	Efi 1	Efi 2	Efi total
1	820	1.0	7.4	25.4	6.5	1.0	7.5	10:25	1197.20	165.10	25.40	190.50	13.79%	2.12%	15.91%
2	821	1.0	9.0	25.6	6.6	0.7	7.3	10:35							
3	950	1.0	8.8	25.6	8.0	0.8	8.8	10:45	1387.00	204.80	20.48	225.28	14.77%	1.48%	16.24%
4	963	1.0	8.8	25.4	7.6	1.0	8.6	10:55	1405.98	193.04	25.40	218.44	13.73%	1.81%	15.54%
5	982	1.0	9.1	25.5	7.5	1.3	8.8	11:05	1433.72	191.25	33.15	224.40	13.34%	2.31%	15.65%
6	947	1.0	8.7	25.2	7.6	1.0	8.6	11:15	1382.62	191.52	25.20	216.72	13.85%	1.82%	15.67%
7	975	1.0	10.0	25.0	7.9	0.9	8.8	11:25	1423.50	197.50	22.50	220.00	13.87%	1.58%	15.45%
8	975	1.0	10.0	25.3	7.7	1.0	8.7	11:35	1423.50	194.81	25.30	220.11	13.69%	1.78%	15.46%
9	848	1.0	9.0	24.5	6.8	0.8	7.6	11:45	1238.08	166.60	19.60	186.20	13.46%	1.58%	15.04%
10	950	1.0	10.0	24.5	7.6	1.2	8.8	11:55	1387.00	186.20	29.40	215.60	13.42%	2.12%	15.54%
11	971	1.0	8.9	25.0	7.5	1.0	8.5	12:05	1417.66	187.50	25.00	212.50	13.23%	1.76%	14.99%
12	1006	1.0	9.4	25.4	7.8	1.0	8.8	12:15	1468.76	198.12	25.40	223.52	13.49%	1.73%	15.22%
13	971	1.0	9.1	25.6	7.4	1.0	8.4	12:25	1417.66	189.44	25.60	215.04	13.36%	1.81%	15.17%
14	1006	1.0	9.4	25.7	7.8	1.0	8.8	12:35	1468.76	200.46	25.70	226.16	13.65%	1.75%	15.40%
15	982	1.0	9.1	25.1	7.6	1.0	8.6	12:45	1433.72	190.76	25.10	215.86	13.31%	1.75%	15.06%
16	957	1.0	10.0	25.1	7.6	1.0	8.6	12:55	1397.22	190.76	25.10	215.86	13.65%	1.80%	15.45%
17	922	1.0	8.6	25.6	7.2	0.9	8.1	1:05	1346.12	184.32	23.04	207.36	13.69%	1.71%	15.40%
18	941	1.0	8.9	25.2	7.5	1.0	8.5	1:15	1373.86	189.00	25.20	214.20	13.76%	1.83%	15.59%
19	681	1.0	6.5	28.5	5.1	0.4	5.5	1:25	994.26	145.35	11.40	156.75	14.62%	1.15%	15.77%
20	845	1.0	9.0	24.8	6.6	1.0	7.6	1:35	1233.70	163.68	24.80	188.48	13.27%	2.01%	15.28%
21	862	1.0	9.0	25.3	6.7	0.8	7.5	1:45	1258.52	169.51	20.24	189.75	13.47%	1.61%	15.08%
22	898	1.0	9.0	25.5	7.0	1.0	8.0	1:55	1311.08	178.50	25.50	204.00	13.61%	1.94%	15.56%
23	904	1.0	8.3	25.4	7.1	1.0	8.1	2:05	1319.84	180.34	25.40	205.74	13.66%	1.92%	15.59%
24	915	1.0	9.0	25.6	7.1	1.0	8.1	2:15	1335.90	181.76	25.60	207.36	13.61%	1.92%	15.52%
25	812	1.0	9.0	26.3	7.0	0.9	7.9	2:25	1185.52	184.10	23.67	207.77	15.53%	2.00%	17.53%
26	873	1.0	8.0	25.6	6.7	1.0	7.7	2:35	1274.58	171.52	25.60	197.12	13.46%	2.01%	15.47%
27	801	1.0	8.0	28.9	6.1	0.6	6.7	2:45	1169.46	176.29	17.34	193.63	15.07%	1.48%	16.56%
28	842	1.0	9.0	25.2	6.6	0.8	7.4	2:55	1229.32	166.32	20.16	186.48	13.53%	1.64%	15.17%
Promedio	907.86	1.0	8.9	25.6	7.2	0.9	8.1	--	1330.17	182.91	23.94	206.85	13.77%	1.79%	15.57%
Maximo	1006	1.0	10.0	28.9	8.0	1.3	8.8	--	1468.76	204.80	33.15	226.16	15.53%	2.31%	17.53%
Minimo	681	1.0	6.5	24.5	5.1	0.4	5.5	--	994.26	145.35	11.40	156.75	13.23%	1.15%	14.99%

Tabla 17. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 2m en superficie verde.

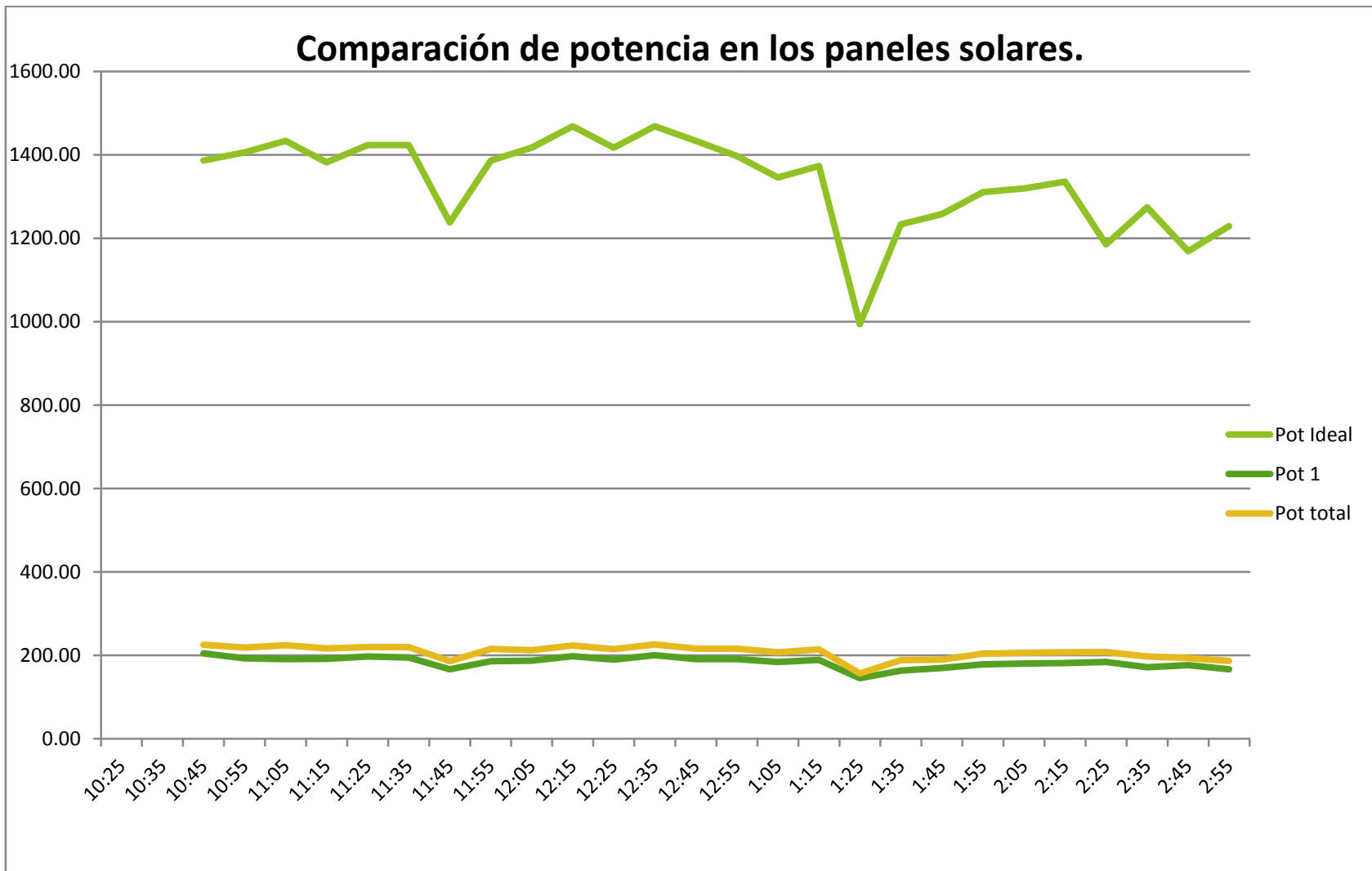


Gráfico 10. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos a 2m en suelo verde.

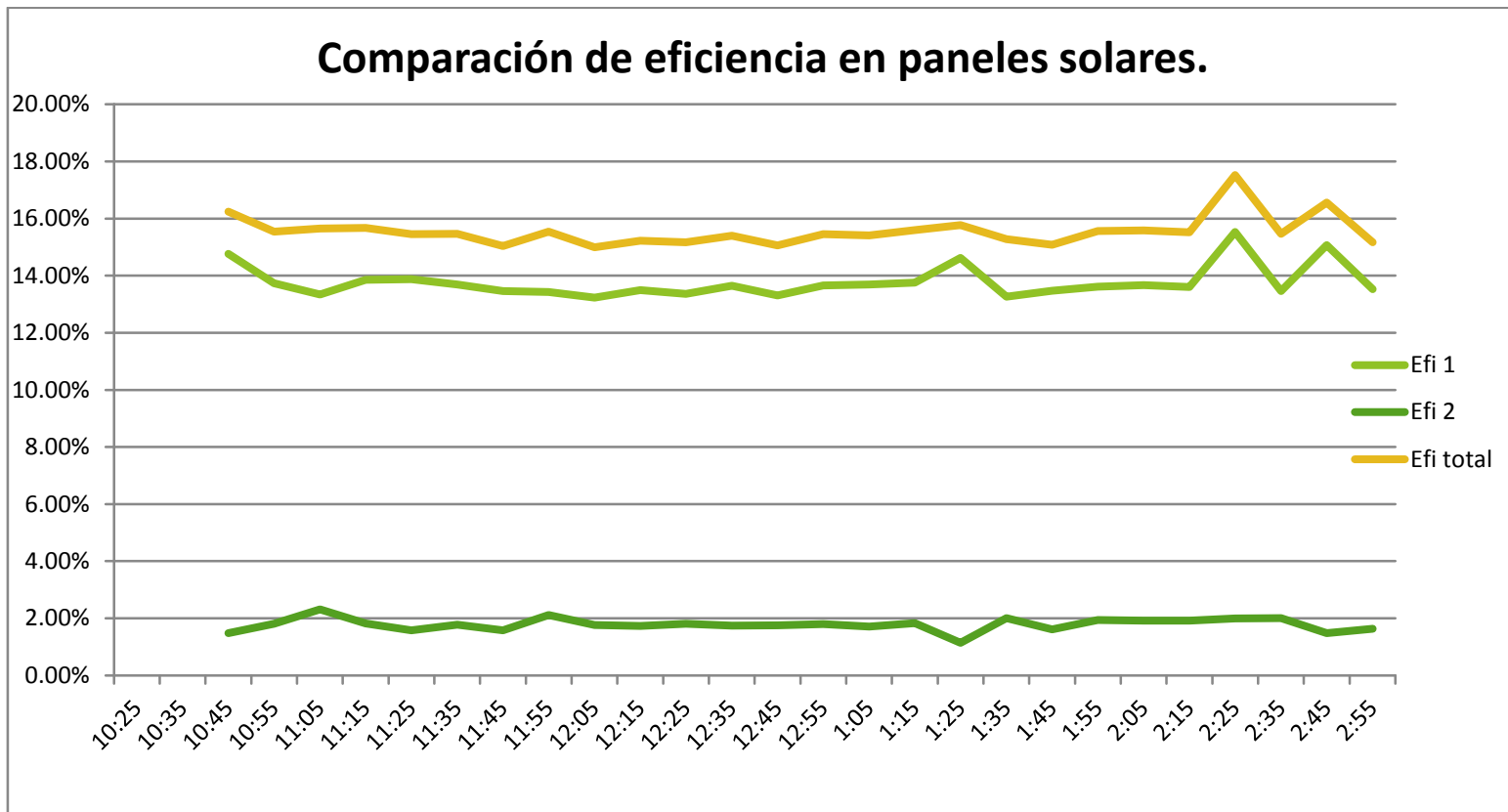


Gráfico 11. Eficiencias generadas por los paneles a 2m del suelo verde.

**5.1.6 Sobre superficie verde a 1 metros de altura con albedo de 0.16.**



*Figura 74. Foto de la superficie de concreto pintado de verde a la altura de 1m.*

## Mediciones cada 10 minutos del día 28 de junio

Mediciones en el intervalo de 11:25 am a 3:05 pm					Albedo = 0.16    Altura = 1m    Superficie: Verde										
No°	Irr Pv ref	Irr Pir G	Irr Pir direc	Vl pv	I1	I2	It	Hora	Pot Ideal	Pot 1	Pot 2	Pot total	Efi 1	Efi 2	Efi total
1	1	954	9.0	25.8	7.8	0.8	8.6	11:25	1392.84	201.24	20.64	221.88	14.45%	1.48%	15.93%
2	1	987	9.3	31.6	7.9	0.9	8.8	11:35	1441.02	249.64	28.44	278.08	17.32%	1.97%	19.30%
3	1	1000	10.0	27.9	8.0	0.8	8.8	11:45	1460.00	223.20	22.32	245.52	15.29%	1.53%	16.82%
4	1	931	10.0	24.8	7.6	0.9	8.5	11:55	1359.26	188.48	22.32	210.80	13.87%	1.64%	15.51%
5	0	197	2.0	25.5	1.5	0.6	2.1	12:05	287.62	38.25	15.30	53.55	13.30%	5.32%	18.62%
6	1	112	10.6	24.8	8.4	1.4	9.8	12:15	163.52	208.32	34.72	243.04	127.40%	21.23%	148.63%
7	1	521	4.7	25.4	4.4	0.7	5.1	12:25	760.66	111.76	17.78	129.54	14.69%	2.34%	17.03%
8	1	477	5.0	26.6	5.6	0.5	6.1	12:35	696.42	148.96	13.30	162.26	21.39%	1.91%	23.30%
9	1	393	4.0	30.4	1.7	0.9	2.6	12:45	573.78	51.68	27.36	79.04	9.01%	4.77%	13.78%
10	1	389	4.0	30.5	2.1	0.5	2.6	12:55	567.94	64.05	15.25	79.30	11.28%	2.69%	13.96%
11	1	548	5.0	29.7	4.4	0.9	5.3	13:05	800.08	130.68	26.73	157.41	16.33%	3.34%	19.67%
12	1	581	6.0	28.5	4.1	0.9	5.0	13:15	848.26	116.85	25.65	142.50	13.78%	3.02%	16.80%
13	1	970	10.0	23.5	8.3	0.9	9.2	13:25	1416.20	195.05	21.15	216.20	13.77%	1.49%	15.27%
14	1	868	9.0	24.0	7.2	0.7	7.9	13:35	1267.28	172.80	16.80	189.60	13.64%	1.33%	14.96%
15	1	905	10.0	23.8	7.3	0.9	8.2	13:45	1321.30	173.74	21.42	195.16	13.15%	1.62%	14.77%
16	1	846	9.0	24.5	6.9	0.7	7.6	13:55	1235.16	169.05	17.15	186.20	13.69%	1.39%	15.07%
17	1	872	9.0	24.1	6.9	0.7	7.6	14:05	1273.12	166.29	16.87	183.16	13.06%	1.33%	14.39%
18	1	813	8.0	23.8	6.5	0.6	7.1	14:15	1186.98	154.70	14.28	168.98	13.03%	1.20%	14.24%
19	1	836	9.0	26.8	5.2	0.7	5.9	14:25	1220.56	139.36	18.76	158.12	11.42%	1.54%	12.95%
20	1	763	8.0	24.1	6.1	0.7	6.8	14:35	1113.98	147.01	16.87	163.88	13.20%	1.51%	14.71%
21	1	768	8.0	24.4	6.2	0.7	6.9	14:45	1121.28	151.28	17.08	168.36	13.49%	1.52%	15.01%
22	1	754	8.0	24.5	6.0	0.8	6.8	14:55	1100.84	147.00	19.60	166.60	13.35%	1.78%	15.13%
23	1	727	8.0	24.5	5.7	0.6	6.3	15:05	1061.42	139.65	14.70	154.35	13.16%	1.38%	14.54%
<b>Promedio</b>		<b>704.87</b>	<b>7.6</b>	<b>26.1</b>	<b>5.9</b>	<b>0.8</b>	<b>6.7</b>	--	<b>1029.11</b>	<b>151.70</b>	<b>20.20</b>	<b>171.89</b>	<b>18.83%</b>	<b>2.93%</b>	<b>21.76%</b>
<b>Maximo</b>	<b>1</b>	<b>1000</b>	<b>10.6</b>	<b>31.6</b>	<b>8.4</b>	<b>1.4</b>	<b>9.8</b>	--	<b>1460.00</b>	<b>249.64</b>	<b>34.72</b>	<b>278.08</b>	<b>127.40%</b>	<b>21.23%</b>	<b>148.63%</b>
<b>Minimo</b>	<b>0</b>	<b>112</b>	<b>2.0</b>	<b>23.5</b>	<b>1.5</b>	<b>0.5</b>	<b>2.1</b>	--	<b>163.52</b>	<b>38.25</b>	<b>13.30</b>	<b>53.55</b>	<b>9.01%</b>	<b>1.20%</b>	<b>12.95%</b>

*Tabla 18. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 1m en superficie verde.*

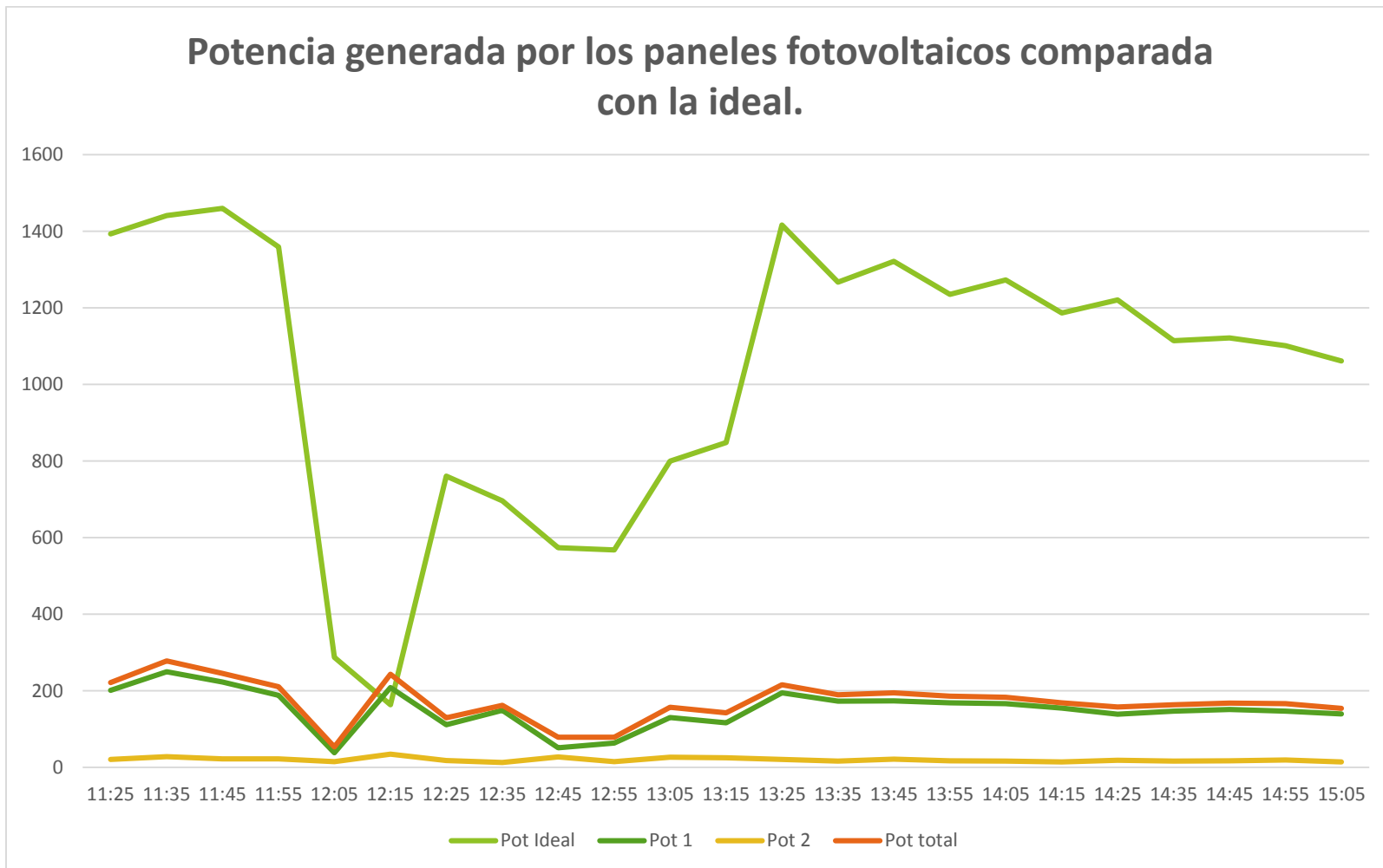


Gráfico 12. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos a 1m en superficie verde.

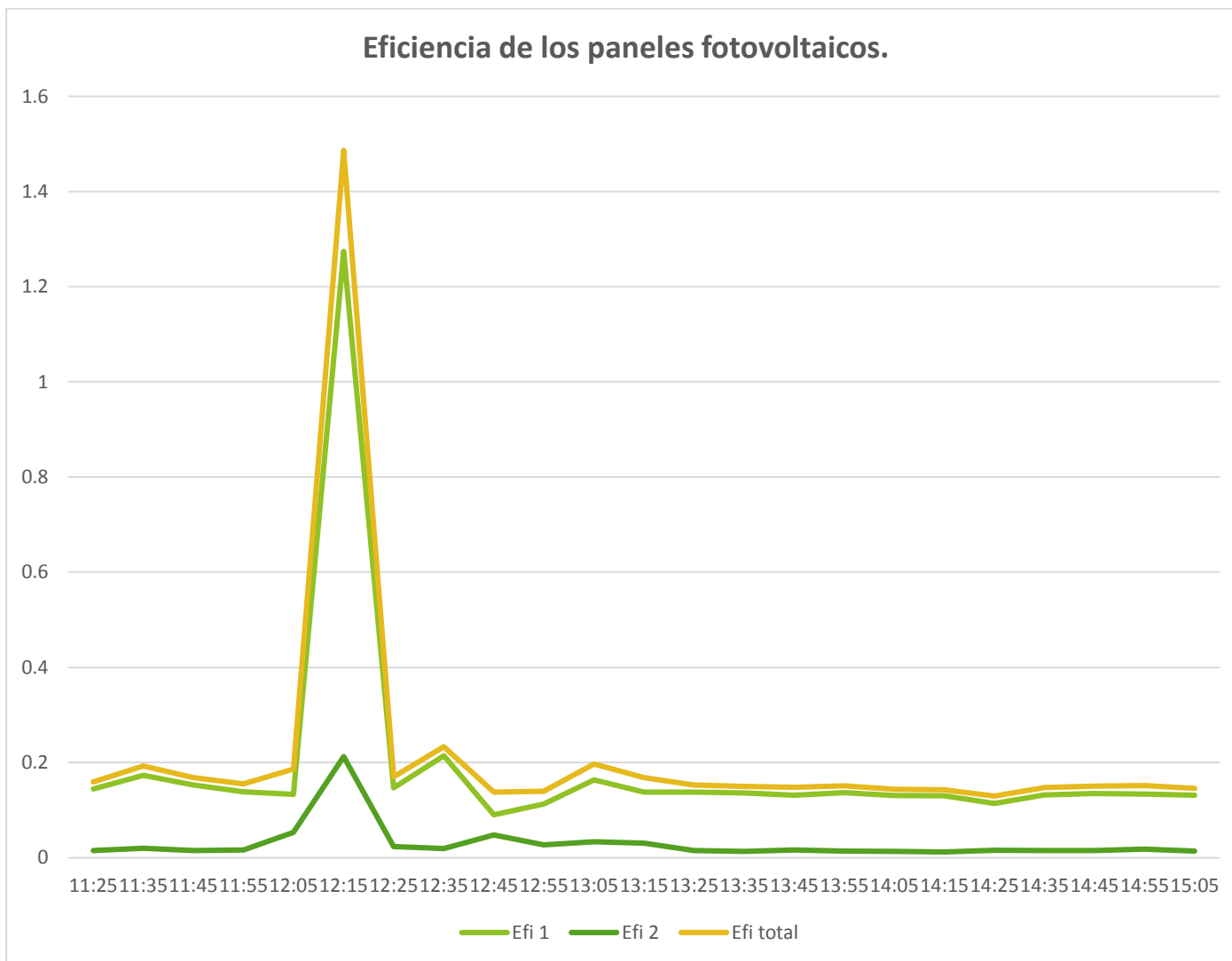


Gráfico 13. Eficiencias generadas por los paneles a 1m del suelo con verde.

**5.1.7 Sobre superficie café a 1 metros de altura con albedo de 0.10.**



*Figura 75. Foto de la superficie de concreto pintado de café a la altura de 1m.*

## Mediciones cada 10 minutos del día 29 de junio

Mediciones en el intervalo de 10:40 am a 1:20 pm							Albedo =0.10 Altura = 1m Superficie: Café										
No°	Irr Pv 13° front y post	Irrefle	Irr Pir G	Irr Pir direc	Vl pv	I1	I2	It	Hora	Pot Ideal	Pot 1	Pot 2	Pot total	Efi 1	Efi 2	Efi total	
1	4.0	1.0	2.0	354	4	30.5	1.5	0.5	2.0	10:40	516.84	45.75	15.25	61.00	8.85%	2.95%	11.80%
2	3.0	0.0	2.0	256	3	30.1	1.6	0.4	2.0	10:50	373.76	48.16	12.04	60.20	12.89%	3.22%	16.11%
3	3.0	0.0	2.0	275	3	31.4	2.1	0.4	2.5	11:00	401.50	65.94	12.56	78.50	16.42%	3.13%	19.55%
4	4.0	1.0	2.0	333	4	28.4	1.7	0.2	1.9	11:10	486.18	48.28	5.68	53.96	9.93%	1.17%	11.10%
5	12.0	2.0	3.0	1250	12	26.6	9.5	0.7	10.2	11:20	1825.00	252.70	18.62	271.32	13.85%	1.02%	14.87%
6	4.0	1.0	2.0	394	4	32.1	2.8	0.4	3.2	11:30	575.24	89.88	12.84	102.72	15.62%	2.23%	17.86%
7	12.0	2.0	3.0	1198	12	30.8	9.5	0.7	10.2	11:40	1749.08	292.60	21.56	314.16	16.73%	1.23%	17.96%
8	12.0	1.0	3.0	1287	14	28.0	9.9	1.2	11.1	11:50	1879.02	277.20	33.60	310.80	14.75%	1.79%	16.54%
9	4.0	1.0	2.0	365	4	30.4	2.2	0.3	2.5	12:00	532.90	66.88	9.12	76.00	12.55%	1.71%	14.26%
10	12.0	2.0	3.0	1142	13	27.9	8.8	1.1	9.9	12:10	1667.32	245.52	30.69	276.21	14.73%	1.84%	16.57%
11	4.0	1.0	2.0	401	4	30.1	3.6	0.4	4.0	12:20	585.46	108.36	12.04	120.40	18.51%	2.06%	20.57%
12	12.0	2.0	3.0	1296	14	29.9	8.8	2.2	11.0	12:30	1892.16	263.12	65.78	328.90	13.91%	3.48%	17.38%
13	10.2	1.0	2.0	1195	10.2	30.2	7.2	1.3	8.5	12:40	1744.70	217.44	39.26	256.70	12.46%	2.25%	14.71%
14	10.0	1.0	2.0	1024	11	25.5	8.1	1.0	9.1	12:50	1495.04	206.55	25.50	232.05	13.82%	1.71%	15.52%
15	11.0	2.0	3.0	1144	12	27.8	8.8	1.1	9.9	13:00	1670.24	244.64	30.58	275.22	14.65%	1.83%	16.48%
16	2.3	0.0	1.0	266	2.3	28.8	1.9	0.3	2.2	13:10	388.36	54.72	8.64	63.36	14.09%	2.22%	16.31%
17	2.0	0.0	1.0	214	2	31.2	1.5	0.1	1.6	13:20	312.44	46.80	3.12	49.92	14.98%	1.00%	15.98%
Promedio	7.1	1.1	2.2	729.06	7.56	29.4	5.3	0.7	6.0	--	1064.43	151.44	20.99	172.44	14.04%	2.05%	16.09%
Maximo	12.0	2.0	3.0	1296	14.0	32.1	9.9	2.2	11.1	--	1892.16	292.60	65.78	328.90	18.51%	3.48%	20.57%
Minimo	2.0	0.0	1.0	214	2.0	25.5	1.5	0.1	1.6	--	312.44	45.75	3.12	49.92	8.85%	1.00%	11.10%

*Tabla 19. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 1m en superficie café.*

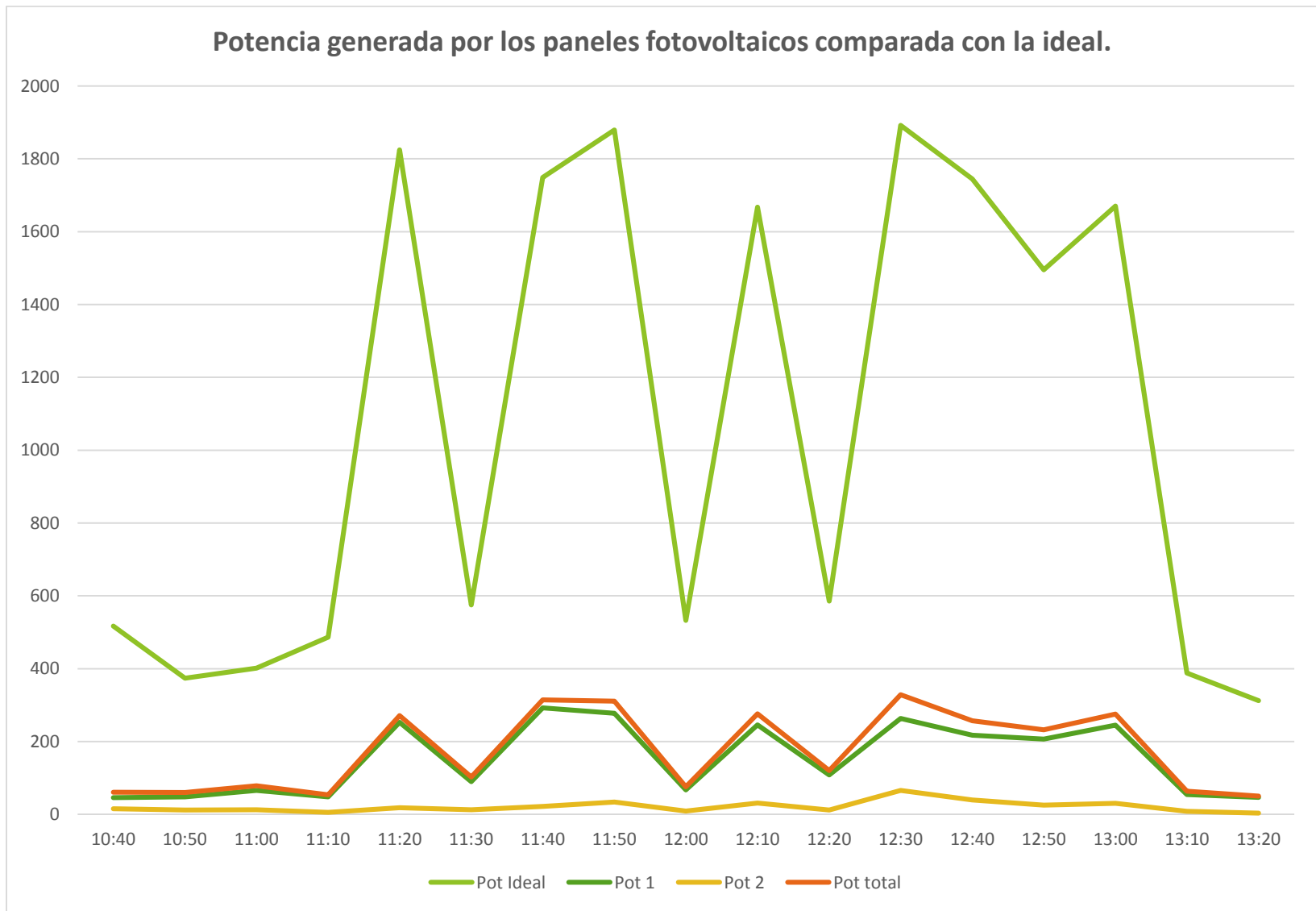


Gráfico 14. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos a 1m en superficie café.

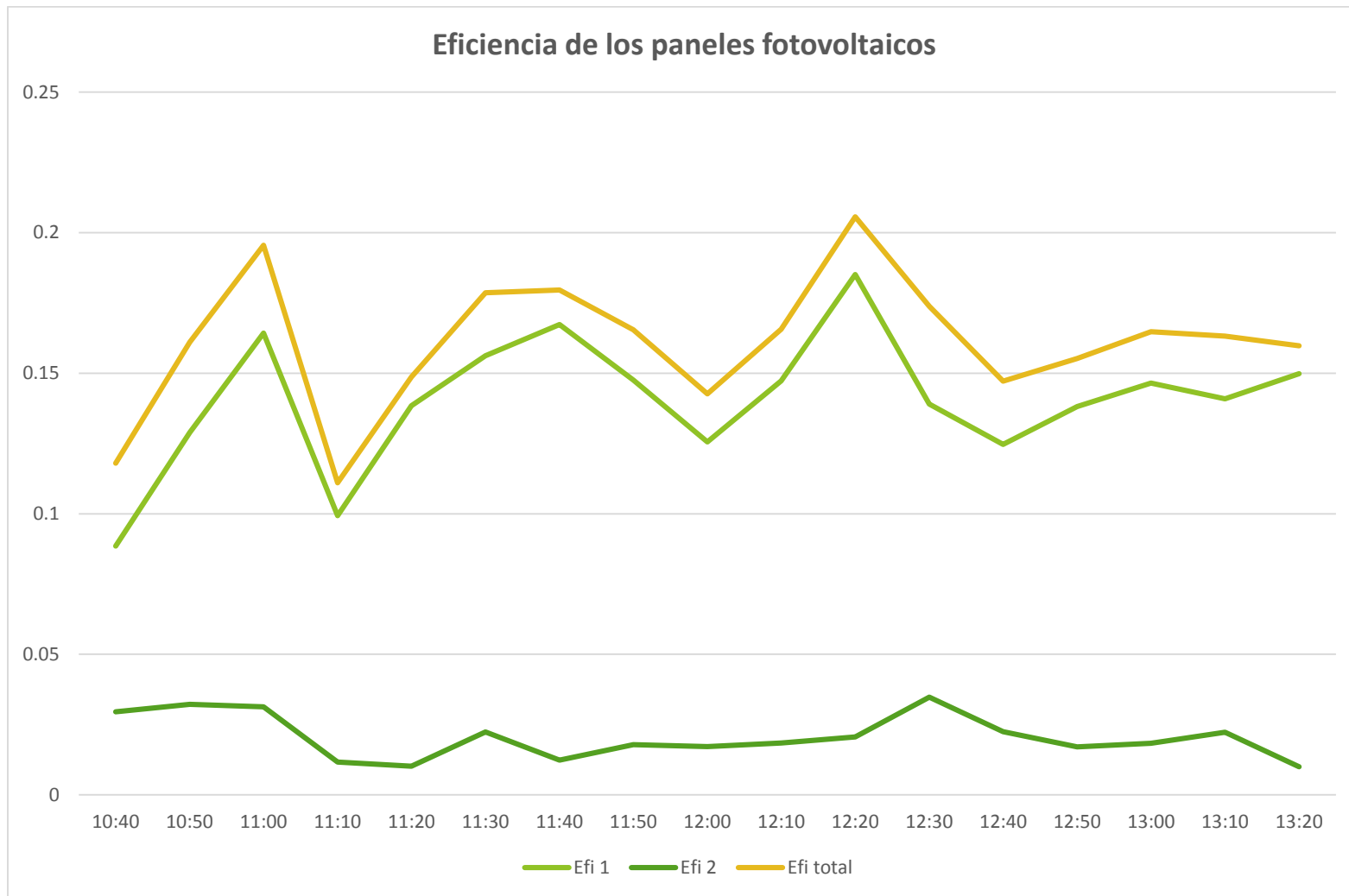


Gráfico 15. Eficiencias generadas por los paneles a 1m del suelo con superficie café.

**5.1.8 Sobre superficie café a 2 metros de altura con albedo de 0.10.**



*Figura 76. Foto de la superficie de concreto pintado de café a la altura de 2m.*

## Mediciones cada 10 minutos del día 30 de junio

Mediciones en el intervalo de 11:20 am a 3:00 pm							Albedo =0.10 Altura = 2m Superficie: Café										
No°	Irr Pv 13° front y post	Irrefle	Irr Pir G	Irr Pir direc	Vlvp	I1	I2	It	Hora	Pot Ideal	Pot 1	Pot 2	Pot total	Efi 1	Efi 2	Efi total	
1	8.6	1.0	1.0	989	9.0	24.8	7.7	1.1	8.8	11:20	1443.94	190.96	27.28	218.24	13.22%	1.89%	15.11%
2	8.6	1.0	1.0	983	8.9	24.6	7.9	1.1	9.0	11:30	1435.18	194.34	27.06	221.40	13.54%	1.89%	15.43%
3	2.0	0.0	1.0	262	3.0	24.5	2.3	0.3	2.6	11:40	382.52	56.35	7.35	63.70	14.73%	1.92%	16.65%
4	11.0	1.0	2.0	1089	11.0	24.6	8.7	1.2	9.9	11:50	1589.94	214.02	29.52	243.54	13.46%	1.86%	15.32%
5	10.0	1.0	2.0	1038	9.6	29.4	8.9	1.1	10.0	12:00	1515.48	261.66	32.34	294.00	17.27%	2.13%	19.40%
6	11.0	1.0	2.0	1072	11.0	23.9	9.4	1.0	10.4	12:10	1565.12	224.66	23.90	248.56	14.35%	1.53%	15.88%
7	3.0	0.0	2.0	241	3.0	23.9	2.2	0.2	2.4	12:20	351.86	52.58	4.78	57.36	14.94%	1.36%	16.30%
8	3.0	0.0	2.0	265	3.0	27.5	2.3	0.3	2.6	12:30	386.90	63.25	8.25	71.50	16.35%	2.13%	18.48%
9	10.1	1.0	2.0	1079	10.2	24.6	8.8	0.9	9.7	12:40	1575.34	216.48	22.14	238.62	13.74%	1.41%	15.15%
10	10.0	1.0	2.0	1006	10.0	23.4	8.4	1.0	9.4	12:50	1468.76	196.56	23.40	219.96	13.38%	1.59%	14.98%
11	10.0	1.0	2.0	1016	11.0	23.5	8.3	1.1	9.4	13:00	1483.36	195.05	25.85	220.90	13.15%	1.74%	14.89%
12	10.0	1.0	2.0	960	10.0	23.3	8.0	1.2	9.2	13:10	1401.60	186.40	27.96	214.36	13.30%	1.99%	15.29%
13	10.0	1.0	1.0	976	10.0	23.2	7.9	1.2	9.1	13:20	1424.96	183.28	27.84	211.12	12.86%	1.95%	14.82%
14	10.0	1.0	1.0	1000	10.0	23.8	8.4	1.1	9.5	13:30	1460.00	199.92	26.18	226.10	13.69%	1.79%	15.49%
15	10.0	1.0	2.0	1041	11.0	24.0	8.7	1.1	9.8	13:40	1519.86	208.80	26.40	235.20	13.74%	1.74%	15.48%
16	10.0	1.0	1.0	752	8.0	30.6	5.7	0.6	6.3	13:50	1097.92	174.42	18.36	192.78	15.89%	1.67%	17.56%
17	6.0	1.0	1.0	928	10.0	23.4	7.5	1.1	8.6	14:00	1354.88	175.50	25.74	201.24	12.95%	1.90%	14.85%
18	9.0	1.0	1.0	879	9.0	23.3	7.1	1.0	8.1	14:10	1283.34	165.43	23.30	188.73	12.89%	1.82%	14.71%
19	9.0	1.0	2.0	952	10.0	23.4	7.6	1.2	8.8	14:20	1389.92	177.84	28.08	205.92	12.79%	2.02%	14.82%
20	9.0	1.0	2.0	863	9.0	30.8	6.7	0.9	7.6	14:30	1259.98	206.36	27.72	234.08	16.38%	2.20%	18.58%
21	8.0	1.0	2.0	918	10.0	31.5	7.2	1.2	8.4	14:40	1340.28	226.80	37.80	264.60	16.92%	2.82%	19.74%
22	9.0	1.0	2.0	860	9.0	23.2	6.4	1.0	7.4	14:50	1255.60	148.48	23.20	171.68	11.83%	1.85%	13.67%
23	8.0	1.0	2.0	859	7.5	30.5	6.5	0.9	7.4	15:00	1254.14	198.25	27.45	225.70	15.81%	2.19%	18.00%
Promedio	8.5	0.9	1.7	870.78	8.8	25.5	7.1	0.9	8.0	--	1271.34	179.02	24.00	203.01	14.23%	1.89%	16.11%
Maximo	11.0	1.0	2.0	1089	11.0	31.5	9.4	1.2	10.4	--	1589.94	261.66	37.80	294.00	17.27%	2.82%	19.74%
Minimo	2.0	0.0	1.0	241	3.0	23.2	2.2	0.2	2.4	--	351.86	52.58	4.78	57.36	11.83%	1.36%	13.67%

*Tabla 20. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 2m en superficie café.*

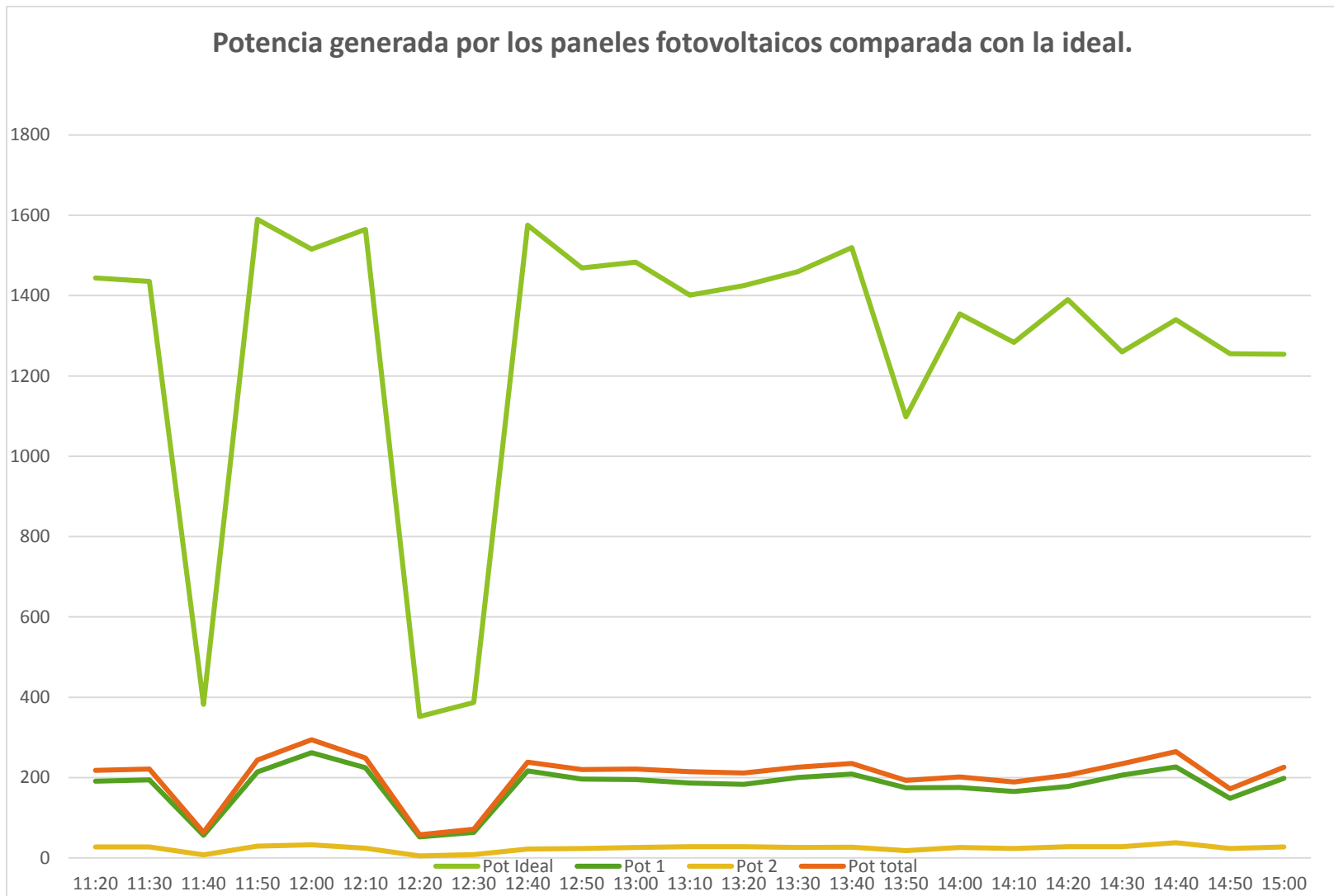


Gráfico 16. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos a 2m del suelo con superficie café.

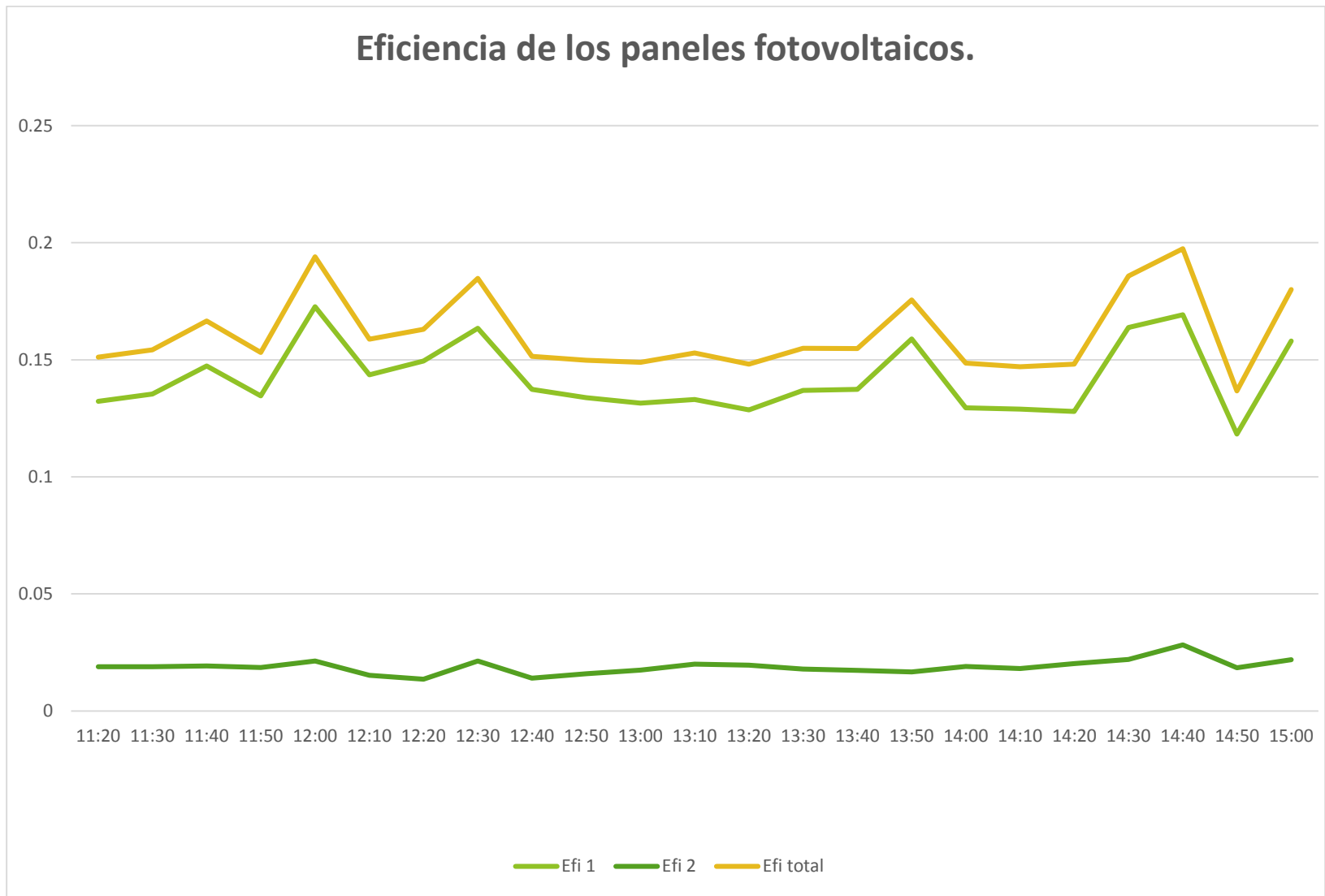


Gráfico 17. Eficiencias generadas por los paneles a 2m del suelo con superficie café.

**5.1.9 Sobre superficie negra a 2 metros de altura con albedo de 0.07.**



*Figura 77. Foto de la superficie de concreto pintado de negro a la altura de 2m.*

## Mediciones cada 10 minutos del día 1 de julio

Mediciones en el intervalo de 10:40 am a 3:00 pm								Albedo =0.07 Altura = 2m Superficie: negra										
No°	Irr Pv 13° front y post	Irrefle sombra	Ir pv	Irr Pir G	Irr Pir direc	Vl pv	I1	I2	It	Hora	Pot Ideal	Pot 1	Pot 2	Pot total	Efi 1	Efi 2	Efi total	
1	11	1	2	1143	1134	12	28.5	8.5	0.7	9.2	10:40	1655.64	242.25	19.95	262.20	14.63%	1.20%	15.84%
2	1096	80	238	1089	1125	12	26.5	8.5	0.7	9.2	10:50	1642.50	225.25	18.55	243.80	13.71%	1.13%	14.84%
3	334	65	247	255	251	2.2	25.9	1.9	0.2	2.1	11:00	366.46	49.21	5.18	54.39	13.43%	1.41%	14.84%
4	990	84	284	1132	1117	12	25.1	9	0.8	9.8	11:10	1630.82	225.90	20.08	245.98	13.85%	1.23%	15.08%
5	253	32	187	264	244	2.2	25.6	2.3	0.2	2.5	11:20	356.24	58.88	5.12	64.00	16.53%	1.44%	17.97%
6	1077	80	266	1144	1147	11	25.8	9.1	0.8	9.9	11:30	1674.62	234.78	20.64	255.42	14.02%	1.23%	15.25%
7	244	27	197	262	236	3	25.6	2.2	0.2	2.4	11:40	344.56	56.32	5.12	61.44	16.35%	1.49%	17.83%
8	1071	60	277	1160	1140	12	25.5	9.3	0.8	10.1	11:50	1664.40	237.15	20.40	257.55	14.25%	1.23%	15.47%
9	226	27	145	178	165	2	25	1.4	0.2	1.6	12:00	240.90	35.00	5.00	40.00	14.53%	2.08%	16.60%
10	1054	77	255	1128	1144	12	25.7	9.2	0.8	10.0	12:10	1670.24	236.44	20.56	257.00	14.16%	1.23%	15.39%
11	261	14	169	300	302	3	28.6	2.5	0.2	2.7	12:20	440.92	71.50	5.72	77.22	16.22%	1.30%	17.51%
12	1032	69	162	1106	1102	11	24.8	10.1	0.7	10.8	12:30	1608.92	250.48	17.36	267.84	15.57%	1.08%	16.65%
13	1005	58	172	1094	1074	11	25.7	8.5	0.8	9.3	12:40	1568.04	218.45	20.56	239.01	13.93%	1.31%	15.24%
14	9076	56	107	1035	1038	11	25.1	8.5	0.8	9.3	12:50	1515.48	213.35	20.08	233.43	14.08%	1.32%	15.40%
15	909	49	77	977	971	10	24.7	7.8	0.8	8.6	13:00	1417.66	192.66	19.76	212.42	13.59%	1.39%	14.98%
16	990	57	167	1050	1040	11	25.8	8.2	0.8	9.0	13:10	1518.40	211.56	20.64	232.20	13.93%	1.36%	15.29%
17	950	47	129	1034	1016	11	25.7	8	0.7	8.7	13:20	1483.36	205.60	17.99	223.59	13.86%	1.21%	15.07%
18	966	50	115	1053	1040	11	25.8	8	0.9	8.9	13:30	1518.40	206.40	23.22	229.62	13.59%	1.53%	15.12%
19	939	51	132	1022	1012	9.4	25.5	8	0.8	8.8	13:40	1477.52	204.00	20.40	224.40	13.81%	1.38%	15.19%
20	130	0	106	149	132	2	25.7	1.2	0.1	1.3	13:50	192.72	30.84	2.57	33.41	16.00%	1.33%	17.34%
21	810	42	64	891	885	8.1	25.5	7	0.7	7.7	14:00	1292.10	178.50	17.85	196.35	13.81%	1.38%	15.20%
22	894	25	109	972	957	9.1	29.2	7.2	0.7	7.9	14:10	1397.22	210.24	20.44	230.68	15.05%	1.46%	16.51%
23	887	50	105	968	957	10	25.6	7.7	0.7	8.4	14:20	1397.22	197.12	17.92	215.04	14.11%	1.28%	15.39%
24	165	0	103	180	165	2	25.2	1.7	0.1	1.8	14:30	240.90	42.84	2.52	45.36	17.78%	1.05%	18.83%
25	736	47	133	806	807	8	25.5	6.3	0.5	6.8	14:40	1178.22	160.65	12.75	173.40	13.63%	1.08%	14.72%
26	140	0	111	150	136	2	24.8	1.4	0.1	1.5	14:50	198.56	34.72	2.48	37.20	17.49%	1.25%	18.73%
27	153	0	99	177	164	2	25.2	1.6	0.1	1.7	15:00	239.44	40.32	2.52	42.84	16.84%	1.05%	17.89%
<b>Promedio</b>	<b>977.74</b>	<b>42.52</b>	<b>154.00</b>	<b>767.37</b>	<b>759.30</b>	<b>7.85</b>	<b>25.84</b>	<b>6.11</b>	<b>0.55</b>	<b>6.67</b>	<b>--</b>	<b>1108.57</b>	<b>158.16</b>	<b>14.27</b>	<b>172.44</b>	<b>14.77%</b>	<b>1.31%</b>	<b>16.08%</b>
<b>Maximo</b>	<b>9076</b>	<b>84</b>	<b>284</b>	<b>1160</b>	<b>1147</b>	<b>12.0</b>	<b>29.2</b>	<b>10.1</b>	<b>0.9</b>	<b>10.8</b>	<b>--</b>	<b>1674.62</b>	<b>250.48</b>	<b>23.22</b>	<b>267.84</b>	<b>17.78%</b>	<b>2.08%</b>	<b>18.83%</b>
<b>Minimo</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>149</b>	<b>132</b>	<b>2.0</b>	<b>24.7</b>	<b>1.2</b>	<b>0.1</b>	<b>1.3</b>	<b>--</b>	<b>192.72</b>	<b>30.84</b>	<b>2.48</b>	<b>33.41</b>	<b>13.43%</b>	<b>1.05%</b>	<b>14.72%</b>

Tabla 21. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 2m en superficie de negra.

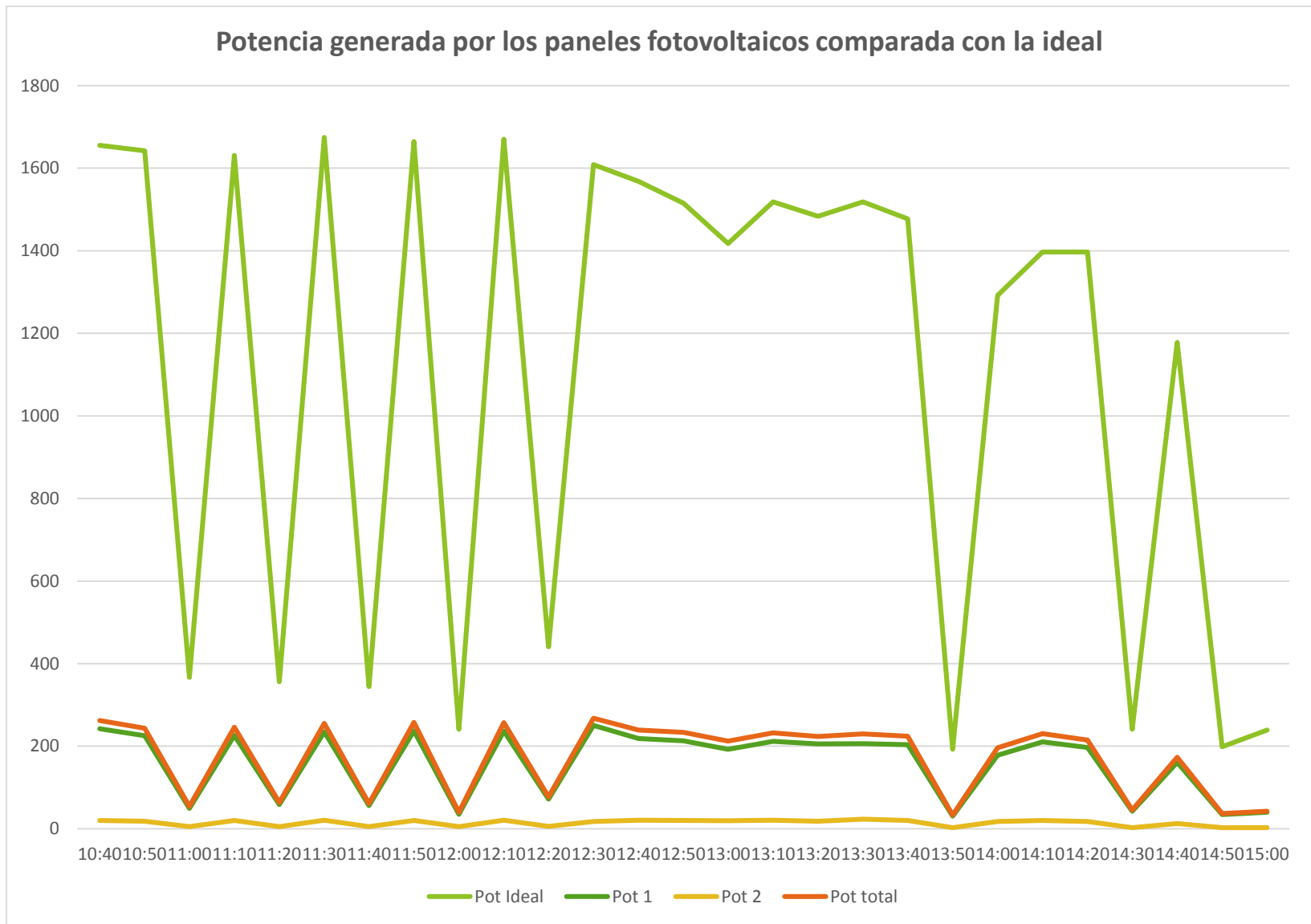


Gráfico 18. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos a 2m del suelo en superficie negra.

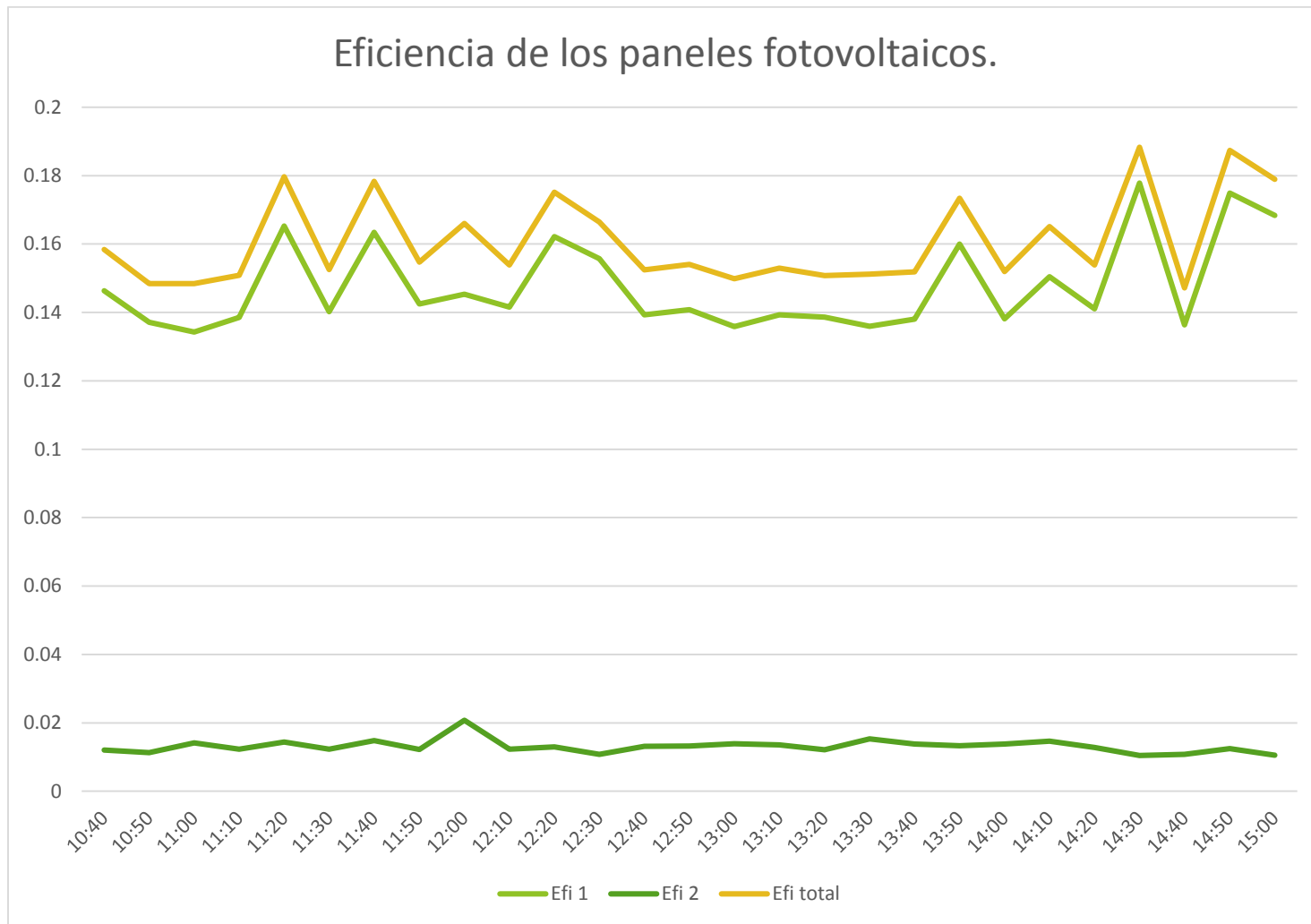


Gráfico 19. Eficiencias generadas por los paneles a 2m del suelo con superficie negra.

**5.1.10 Sobre superficie negra a 1 metros de altura con albedo de 0.07.**



*Figura 78. Foto de la superficie de concreto pintado de negro a la altura de 1m.*

<b>Mediciones cada 10 minutos del día 7 de julio</b>																		
Mediciones en el intervalo de 10:40 am a 3:10 pm							Albedo = 0.07 Altura = 1m Superficie: negra											
No°	Irr Pv 13° front y post	Irrefle sombra	Ir pv	Irr Pir G	Irr Pir direc	Vl pv	I1	I2	It	Hora	Pot Ideal	Pot 1	Pot 2	Pot total	Efi 1	Efi 2	Efi total	
1	933	22	259	921	952	10	31.5	7.5	0.4	7.9	10:40	1389.92	236.25	12.60	248.85	17.00%	0.91%	17.90%
2	831	13	234	888	894	9	29.9	7.5	0.3	7.8	10:50	1305.24	224.25	8.97	233.22	17.18%	0.69%	17.87%
3	952	14	233	1014	1028	11	24	7.8	0.4	8.2	11:00	1500.88	187.20	9.60	196.80	12.47%	0.64%	13.11%
4	864	12	168	848	953	10	24.9	7.7	0.4	8.1	11:10	1391.38	191.73	9.96	201.69	13.78%	0.72%	14.50%
5	850	16	142	895	905	9.3	25.3	7.3	0.3	7.6	11:20	1321.30	184.69	7.59	192.28	13.98%	0.57%	14.55%
6	917	18	142	985	997	10	28.8	7.7	0.4	8.1	11:30	1455.62	221.76	11.52	233.28	15.23%	0.79%	16.03%
7	1023	24	182	1083	1096	11	29.9	8.3	0.4	8.7	11:40	1600.16	248.17	11.96	260.13	15.51%	0.75%	16.26%
8	1053	21	171	1114	1124	12	26.9	8.5	0.4	8.9	11:50	1641.04	228.65	10.76	239.41	13.93%	0.66%	14.59%
9	1067	28	220	1164	1151	12	30.3	9	0.4	9.4	12:00	1680.46	272.70	12.12	284.82	16.23%	0.72%	16.95%
10	317	0	201	284	275	3	24.6	2.5	0.1	2.6	12:10	401.50	61.50	2.46	63.96	15.32%	0.61%	15.93%
11	1107	35	230	1171	1185	12	24.9	9.7	0.4	10.1	12:20	1730.10	241.53	9.96	251.49	13.96%	0.58%	14.54%
12	287	0	173	300	282	3	24.3	2.5	0.1	2.6	12:30	411.72	60.75	2.43	63.18	14.76%	0.59%	15.35%
13	180	0	125	195	188	2.2	29.9	1.4	0.1	1.5	12:40	274.48	41.86	2.99	44.85	15.25%	1.09%	16.34%
14	1035	31	129	1073	1092	11	24.4	8.9	0.4	9.3	12:50	1594.32	217.16	9.76	226.92	13.62%	0.61%	14.23%
15	1070	43	145	1118	1133	12	24.3	9.4	0.4	9.8	13:00	1654.18	228.42	9.72	238.14	13.81%	0.59%	14.40%
16	190	0	111	190	178	2	23.6	1.5	0.1	1.6	13:10	259.88	35.40	2.36	37.76	13.62%	0.91%	14.53%
17	930	29	129	1032	1021	10.7	23.6	8.3	0.4	8.7	13:20	1490.66	195.88	9.44	205.32	13.14%	0.63%	13.77%
18	901	24	101	1017	1011	11	23.6	8.3	0.4	8.7	13:30	1476.06	195.88	9.44	205.32	13.27%	0.64%	13.91%
19	902	21	118	1000	990	10.5	26.6	7.7	0.4	8.1	13:40	1445.40	204.82	10.64	215.46	14.17%	0.74%	14.91%
20	881	25	130	977	972	10.3	26.8	7.6	0.4	8.0	13:50	1419.12	203.68	10.72	214.40	14.35%	0.76%	15.11%
21	904	24	152	969	967	10	24.9	7.6	0.4	8.0	14:00	1411.82	189.24	9.96	199.20	13.40%	0.71%	14.11%
22	196	0	90	179	161	2	23.4	1.6	0.0	1.6	14:10	235.06	37.44	0.00	37.44	15.93%	0.00%	15.93%
23	274	1	151	542	590	4.8	25.8	4.7	0.2	4.9	14:20	861.40	121.26	5.16	126.42	14.08%	0.60%	14.68%
24	169	0	92	203	182	2.3	26.3	1.5	0.1	1.6	14:30	265.72	39.45	2.63	42.08	14.85%	0.99%	15.84%
25	257	0	159	263	256	3	24	2.1	0.1	2.2	14:40	373.76	50.40	2.40	52.80	13.48%	0.64%	14.13%
	903	23	112	961	939	10.2	28.2	6.8	0.3	7.1	14:50	1370.94	191.76	8.46	200.22	13.99%	0.62%	14.60%
	623	26	115	614	607	6.3	26.3	5.1	0.2	5.3	15:00	886.22	134.13	5.26	139.39	15.14%	0.59%	15.73%
	687	27	127	774	727	7	27.2	5.7	0.4	6.1	15:10	1061.42	155.04	10.88	165.92	14.61%	1.03%	15.63%
<b>Promedio</b>	725.11	17.04	155.04	777.64	780.57	8.13	26.22	6.22	0.30	6.52	--	1139.63	164.32	7.85	172.17	14.50%	0.69%	15.19%
<b>Maximo</b>	1107	43	259	1171	1185	12	31.5	9.7	0.4	10.1	--	1730.10	272.70	12.60	284.82	17.18%	1.09%	17.90%
<b>Minimo</b>	169	0	90	179	161	2	23.4	1.4	0	1.5	--	235.06	35.40	0.00	37.44	12.47%	0.00%	13.11%

Tabla 22. Mediciones realizadas al módulo a una altura de 1m en superficie de negra.

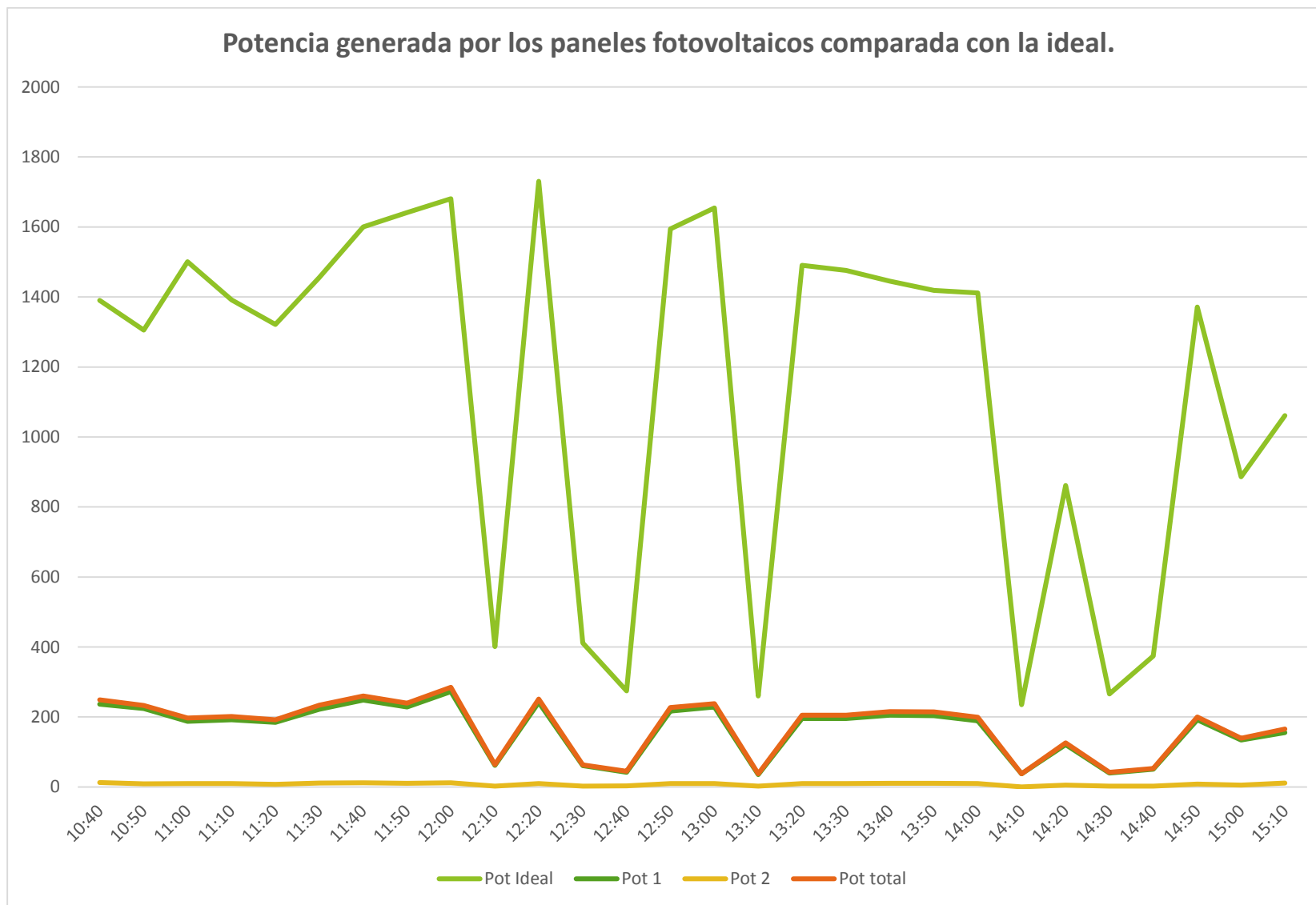


Gráfico 20. Potencias generadas por los paneles fotovoltaicos en superficie negra a 1m.

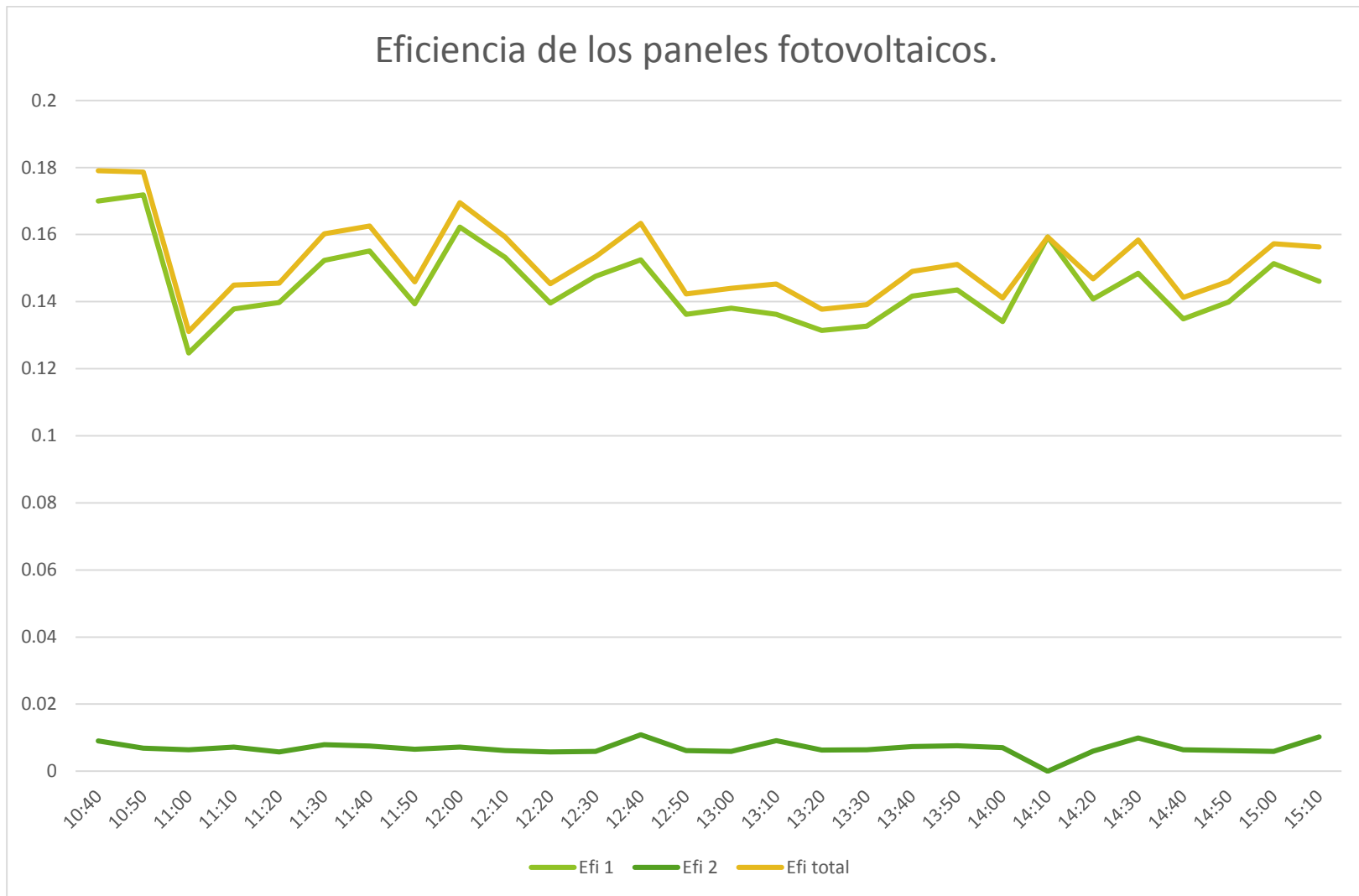


Gráfico 21. Eficiencia producida para superficie negra a 1m del suelo.

Como se ha observado en las tablas de datos y expresadas en las gráficas presentadas, ha sido notable el incremento de la eficiencia en el panel bifacial, aunque no es un porcentaje muy grande se acerca a lo investigado anteriormente, y se espera que al utilizar paneles bifaciales con mejores características como las de DuomaxTwin de Trina Solar, que permita una mejor absorción de la energía por la tecnología de sus barras conductoras y la característica de que al de vidrio transparente deja pasar más luz a través de él y ser aprovechada por el lado posterior de la celda bifacial.

En el porcentaje de ganancia que se obtuvo de la comparación del panel bifacial con respecto al panel monofacial muestra el incremento al hacer uso del panel bifacial, este mismo se puede apreciar en la graficas siguientes en el que se toma el promedio de los datos obtenidos para cada tipo de superficie y a la altura de 1 metro y 2 metros, el porcentaje de ganancia varía según el tipo de superficie sobre el que se ha instalado el panel bifacial, pudiéndose observar que la superficie que incrementa la ganancia es la superficie blanca, llagando a proporcionar un 20.4% más de ganancia a la altura de 2 metros siendo este otro factor importante en la instalación de los paneles bifaciales, según las pruebas realizadas en este trabajo, en la mayoría de las superficies utilizadas la ganancia es mejor a la altura de 2 metros.

Comparación de ganancia con distintos albedos								
	Altura 1m			Altura 2m			1m	2m
Superficie	$\eta_1$ [%]	$\eta_2$ [%]	$\eta_T$ [%]	$\eta_1$ [%]	$\eta_2$ [%]	$\eta_T$ [%]	Ganancia a 1m[%]	Ganancia a 2m[%]
Concreto 30%	20.86	1.68	22.54	19.61	1.64	21.25	7.45	7.72
Blanco 80%	14.57	3.21	17.78	15.77	4.06	19.83	18.05	20.47
Verde 16%	18.83	2.93	21.76	13.77	1.79	15.57	13.47	11.50
Café 10%	14.04	2.05	16.09	14.23	1.89	16.11	12.74	11.73
Negro 7%	14.5	0.69	15.19	14.77	1.31	16.08	4.54	8.15

Tabla 24. Promedio de mediciones realizadas al módulo a una altura de 1m y 2m.

Irradiancia promedio en el sitio de la instalación [W/m2]		
Superficie	Altura 1m	Altura 2m
Concreto 30%	617	639
Blanco 80%	827	644
Verde 16%	705	908
Café 10%	729	871
Negro 7%	781	759

Tabla 23. Promedio de irradiancias para cada superficie a la altura de 1m y 2m.

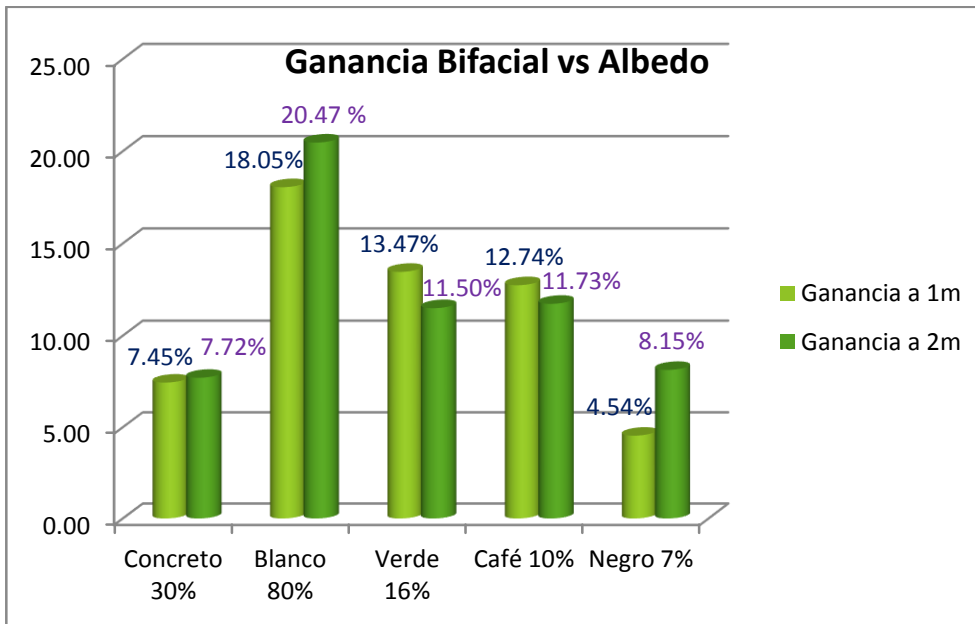


Gráfico 22. Comparación de ganancia bifacial en distintos albedos.

Comparación de eficiencias panel monofacial vs bifacial				
Superficie	Altura 1m		Altura 2m	
	$\eta$ Monofacial	$\eta$ Bifacial	$\eta$ Monofacial	$\eta$ Bifacial
Concreto 30%	20.86	22.54	19.61	21.25
Blanco 80%	14.57	17.78	15.77	19.83
Verde 16%	18.83	21.76	13.77	15.57
Café 10%	14.04	16.09	14.23	16.11
Negro 7%	14.5	15.19	14.77	16.08

Tabla 24. Comparación de eficiencias en panel bifacial y monofacial.

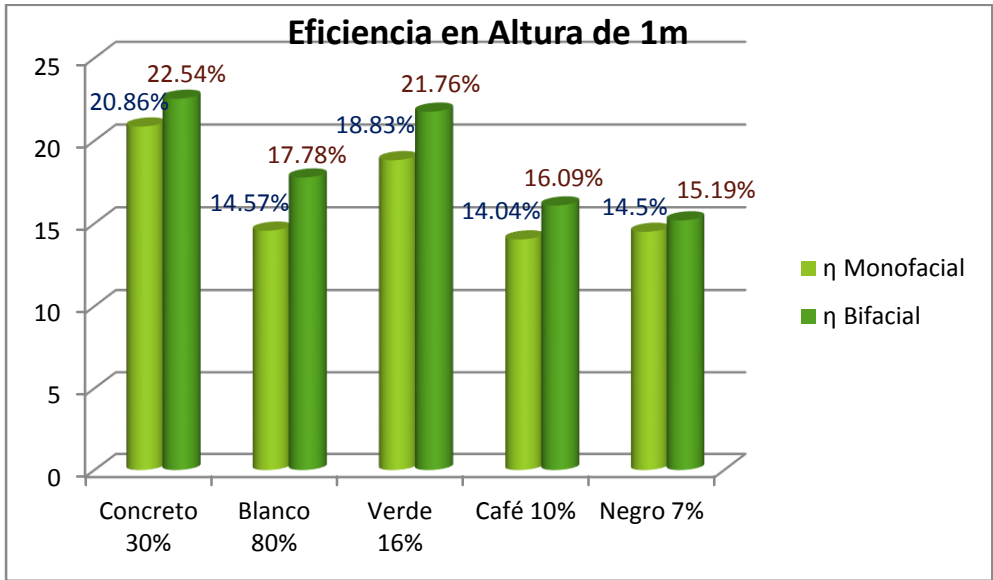


Gráfico 23. Comparación de eficiencias monofacial y bifacial en albedos a altura de 1m.

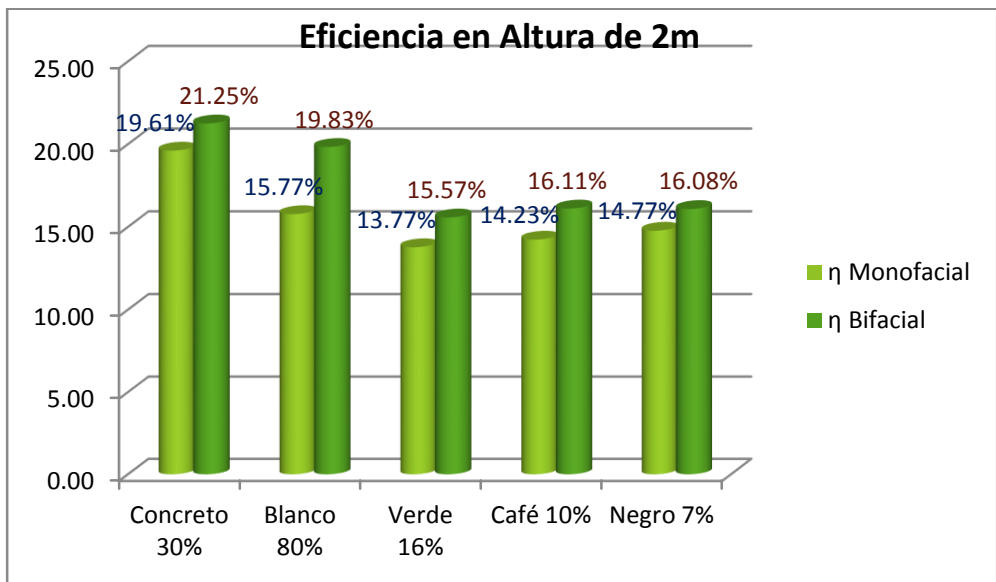


Gráfico 24. Comparación de eficiencias monofacial y bifacial en albedos la altura de 2m.

## 5.2 Porcentaje de generación vrs costo.

### 5.2.1 Presupuesto de Equipo a Utilizar.

Cantidad	Descripción	Precio	Precio Total
2	Paneles fotovoltaicos policristalinos	\$135.00	\$ 270.00
2	Conectores Y mc4	\$6.50	\$ 13.00
14 m	Cable fotovoltaico	\$3.00	\$ 42.00
¼	Pintura blanca	\$5.00	\$ 5.00
¼	Pintura verde	\$5.00	\$ 5.00
¼	Pintura café	\$5.00	\$ 5.00
¼	Pintura negra	\$5.00	\$ 5.00
1	Estructura de soporte.	\$65.00	\$ 65.00
1	Sprake color gris	\$2.00	\$ 2.00
1	Inversor SolarEpic 1000W	\$228.18	\$ 228.18
Total del SFV			\$ 620.18
Total			\$ 640.18

Tabla 25. Presupuesto de gastos para el desarrollo de la instalación.

### 5.2.2 Tiempo en recuperar la inversión

Cálculo de Ganancia Anual

Potencia de MFV 280 Wp

Potencia Instalada=280 + 280(0.8) =504Wp

Número de módulos fotovoltaicos=2

Para la potencia anual se utilizará un valor de Yf = 1500 kWh/kWp/año [11]

Multiplicando el valor de la potencia instalada en MFV por el valor del registro Yf

$$0.504kwp * 1500 \frac{kWh}{kWp} /año = 756 kWh/año$$

Queda que la energía entregada por el SFV es de 756kWh/año.

Según el pliego tarifario de El Salvador, la energía eléctrica en el país tiene un costo de \$0.15/kWh, calculando para obtener el precio.

$$0.15 \frac{\$}{kWh} * 756 kWh/año = \$ 113.40 kWh/año$$

Teniendo este monto y el monto total de la instalación se puede calcular el periodo en años para recuperar la inversión de la forma:

$$\frac{\text{Monto total}}{\text{Monto anual}} = \frac{\$620.18}{\$113.4 kWh/año} = 6 \text{ años}$$

Además, se debe agregar el costo de instalación del sistema fotovoltaico.

Descripción	Costo
Montaje de estructura	\$20.00
Pintura del terreno	\$10.00
Montaje de cableado DC	\$15.00
Colocación del inversor	\$10.00
Perforación para cableado	\$ 5.00
Conexiones DC	\$10.00
Montaje de cableado AC	\$10.00
Conexión a tablero eléctrico	\$20.00
<b>Total</b>	<b>\$100.00</b>

Tabla 26. Costos de mano de obra de la instalación.

Estos costos sumados dan un total de \$740.18, debido a tratarse de una instalación tan pequeña se obvian los costos de mantenimiento.

De la gráfica de garantía de potencia que el fabricante proporciona podemos obtener la producción real a través del tiempo de manera grafica.



Gráfico 25. Degradación anual del panel.

En los primeros 2 años la producción será del 97.5% del valor calculado, luego observamos una caída estable del 0.625% por cada año de vida, con lo cual calculamos para:

1° año:  $\$113.40 \times 97.50\% = \$110.57$

2° año:  $\$113.40 \times 96.88\% = \$109.85$  acumulando una producción de \$220.42

3° año:  $\$113.40 \times 96.25\% = \$109.15$  acumulando una producción de \$329.42

4° año:  $\$113.40 \times 95.62\% = \$108.44$  acumulando una producción de \$437.86

5° año:  $\$113.40 \times 95.00\% = \$107.73$  acumulando una producción de \$545.59

6° año:  $\$113.40 \times 94.38\% = \$107.03$  acumulando una producción de \$652.62

7° año:  $\$113.40 \times 93.75\% = \$106.31$  acumulando una producción de \$758.93

Lo que indica que en 7 años se sobrepasa en \$18.75 el valor de la inversión inicial, además para el 7° año la producción por mes es de \$8.86 a los 6 años con 10 meses la producción será de \$741.21, por lo cual es acertado decir que en 6 años y 10 meses se habrá recuperado la inversión inicial.

Por lo tanto, el tiempo de recuperación es de 6 años con 10 meses.

## Conclusiones.

En base a lo planteado en los objetivos, se realizaron las mediciones a los módulos fotovoltaicos monofacial y el bifacial, en los que a través de estas mediciones de producción de energía eléctrica tomadas a las alturas de 1 metro y 2 metros y repitiendo el mismo procedimiento de medición sobre superficies de distinto color, se notó la variación en la producción de energía eléctrica y basándonos en los datos de eficiencia promedio observamos que en el tipo de superficie de concreto y sobre la superficie verde la eficiencia fue mayor a la altura de 1 metro, mientras que para las superficies blanca, café y negra, la eficiencia fue mayor a la altura de 2 metros.

En cuanto a la ganancia bifacial, así como se ve el aumento en la eficiencia del módulo bifacial comparándolo con el módulo monofacial, así mismo la ganancia es apreciable en la gráfica 22, con una ganancia de 20.47% sobre la superficie blanca siendo está en la que mayor porcentaje de ganancia se obtuvo, seguida por la superficie verde con 13.47% de ganancia, mientras que la menor ganancia se obtuvo sobre la superficie negra con un valor de 4.54% de ganancia. Las ganancias con mayor porcentaje variaron según la altura, para las superficies verde y café, la ganancia mayor se dio a la altura de 1 metro y para la superficie blanca, concreto y negro la mayor ganancia se dio a la altura de 2 metros.

Comparando la eficiencia dada por el módulo monofacial y la eficiencia del módulo bifacial, se llega a la conclusión que tanto para la altura de 1 metro como para 2 metros el módulo bifacial tiene mayor eficiencia, haciendo posible obtener un nivel de ganancia extra, que no se obtendría si solo se utilizará un módulo monofacial, tanto las pruebas realizadas a los módulos usados en este trabajo de graduación, como la gráfica proporcionada por Jingo Solar muestran un aumento de ganancia al usar el módulo Bifacial, dicha ganancia podría llegar a ser mayor si se utiliza un módulo bifacial con mejores características como el anteriormente mencionado módulo bifacial Duomax Twin del fabricante Trina Solar que tiene características que hacen al módulo más eficiente según los datos proporcionados por el fabricante.

Para obtener el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico bifacial de forma manual, se consideran las pérdidas de albedo, altura y distancia de paso que tiene en la parte posterior el panel bifacial, así como también las características que el fabricante proporciona en la hoja de datos en lo referente a la ganancia bifacial, de tal forma que se elijan los datos adecuados del punto de trabajo del panel, obteniendo los datos con la variación de la temperatura y en base a ello se dimensiona el inversor, y las protecciones, considerando un índice de producción anual de 1500 kWh/kWp/año se calculó que la producción del sistema sería de 2340 kWh/año. Al simular con el programa PVSyst se obtiene una producción de 2566kW/año, se observó que los datos calculados están bastante cercanos, los desvíos se debieron a las aproximaciones y estimaciones de datos que se hacen en el cálculo y el programa usa un índice de producción de 2139 kW/kWp/año.

## **Recomendaciones.**

El albedo tiene un rango para diferentes superficies, donde el 0% representa que la superficie no refleja la radiación incidente y 100% que representa a la superficie perfecta que refleja toda la radiación que recibe. Para una instalación bifacial entre mayor es el albedo la producción de la parte posterior de los paneles será mayor por lo que el lugar de la instalación debe tener un albedo elevado.

La altura del módulo también es un factor que tiene un gran impacto en la ganancia bifacial, por ello debe ser considerada en el diseño teniendo en cuenta que entre mayor altura el costo es mayor y se debe optimizar de tal manera que se tenga un porcentaje alto de altura normalizada para aprovechar un alto porcentaje de albedo.

Es muy importante que haya el espacio suficiente entre el módulo y la superficie para poder obtener mayor irradiancia en la parte posterior del panel bifacial, lo que resultaría en una mayor ganancia bifacial.

## Bibliografía.

- [1] I. Mártil, (15, enero, 2016) Energía Solar Fotovoltaica: orígenes, desarrollo y actualidad, [En línea], Disponible: <https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2016/01/15/energia-solar-fotovoltaica-origenes-desarrollo-y-actualidad/>.
- [2] G. S. Agustín Castejón, Instalaciones solares fotovoltaicas.
- [3] PVEDucation, Resistencia Serie, [En línea], Disponible: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operación-de-célula-solar/resistencia-en-serie>.
- [4] PVEDucation, Resistencia Shunt, [En línea], Disponible: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operación-de-célula-solar/resistencia-shunt>.
- [5] E. Belini, (2019, mayo , 07) Anunciada eficiencia del 30,2% para célula bifacial tándem de perovskita, [En línea], Disponible: [pv-magazine-latam.com/2019/03/04/anunciada-eficiencia-del-302-para-celula-bifacial-tandem-de-perovskita/](http://pv-magazine-latam.com/2019/03/04/anunciada-eficiencia-del-302-para-celula-bifacial-tandem-de-perovskita/).
- [6] A. M. A. Tartaglia, Tecnología fotovoltaica con paneles bifaciales, Cartagena, 2019.
- [7] J. Alonso, (2019, mayo, 07) , PLACAS SOLARES BIFACIALES, [En línea], Disponible: <https://www.cambioenergetico.com/blog/placas-solares-bifaciales/>.
- [8] I. Energética, (24, septiembre. 2020) Paneles bifaciales en ángulo fijo y seguimiento, [En línea], Disponible: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59012020000300008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012020000300008).
- [9] B. Calderon, (10, abril, 202) Temperaturas han superado los 42 grados, [En línea], Disponible: <https://www.laprensagrafica.com/elsalvador/Temperaturas-han-superado-los42-C-en-EI-Salvador-y-la-capital-vive-una-ola-de-calor-20200410-0024.html>.
- [10] L. d. diseño., Guía de diseño bifacial., [En línea], Disponible: [https://www.lg.com/global/business/download/resources/solar/Bifacial\\_design\\_gui\\_de\\_Full\\_ver.pdf](https://www.lg.com/global/business/download/resources/solar/Bifacial_design_gui_de_Full_ver.pdf).

[11] E. G. O. Everardo Mejía Mejía, ÍNDICES DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL AMSS, [En línea], Disponible: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/11148/1/Índices%20de%20producción%20de%20energía%20fotovoltaica%20en%20el%20AMSS.pdf>.

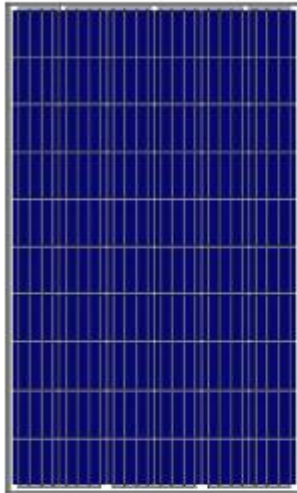
# Anexos.

Panel monofacial utilizado.



## AS-6P30

### POLYCRYSTALLINE MODULE



Passionately  
committed to  
delivering innovative  
energy solution

#### ADVANCED PERFORMANCE & PROVEN ADVANTAGES

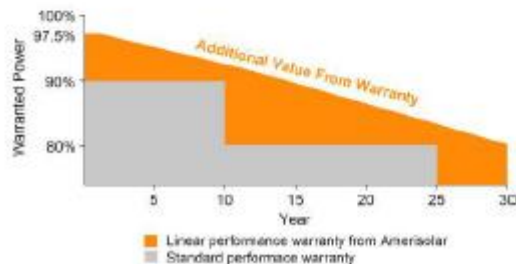
- High module conversion efficiency up to 17.52% by using high efficient solar cells and advanced manufacturing technology.
- Low degradation and excellent performance under high temperature and low light conditions.
- Robust aluminum frame ensures the modules to withstand wind loads up to 2400Pa and snow loads up to 5400Pa.
- High reliability against extreme environmental conditions (passing salt mist, ammonia and hail tests).
- Potential Induced degradation (PID) resistance.
- Positive power tolerance of 0 ~ +3 %.

#### CERTIFICATIONS

- IEC61215, IEC61730, IEC62716, IEC61701, CE, CQC, CGC, ETL(USA), JET(Japan), J-PEC(Japan), Kemco(South Korea), KS(South Korea), MCS(UK), CEC(Australia), FSEC(FL-USA), CSI Eligible(CA-USA), Israel Electric(Israel), InMetro(Brazil), TSE(Turkey)
- ISO9001:2008: Quality management system
- ISO14001:2004: Environmental management system
- OHSAS18001:2007: Occupational health and safety management system

#### SPECIAL WARRANTY

- 12 years limited product warranty.
- Limited linear power warranty: 12 years 91.2% of the nominal power output, 30 years 80.6% of the nominal power output.



ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT STC								
Nominal Power ( $P_{max}$ )	250W	255W	260W	265W	270W	275W	280W	285W
Open Circuit Voltage ( $V_{OC}$ )	38.0V	38.1V	38.2V	38.3V	38.4V	38.5V	38.6V	38.7V
Short Circuit Current ( $I_{SC}$ )	8.75A	8.83A	8.90A	8.98A	9.09A	9.20A	9.31A	9.42A
Voltage at Nominal Power ( $V_{MP}$ )	30.3V	30.5V	30.7V	30.9V	31.1V	31.3V	31.5V	31.7V
Current at Nominal Power ( $I_{MP}$ )	8.26A	8.37A	8.47A	8.58A	8.69A	8.79A	8.89A	9.00A
Module Efficiency (%)	15.37	15.67	15.98	16.29	16.60	16.90	17.21	17.52
Operating Temperature	-40°C to +85°C							
Maximum System Voltage	1000V DC							
Fire Resistance Rating	Type 1 (in accordance with UL1703) / Class C (IEC61730)							
Maximum Series Fuse Rating	15A							

STC: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Cell temperature 25°C, AM1.5

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT NOCT								
Nominal Power ( $P_{max}$ )	184W	188W	191W	195W	199W	202W	206W	210W
Open Circuit Voltage ( $V_{OC}$ )	35.0V	35.1V	35.2V	35.3V	35.4V	35.5V	35.6V	35.7V
Short Circuit Current ( $I_{SC}$ )	7.09A	7.15A	7.21A	7.27A	7.36A	7.45A	7.54A	7.63A
Voltage at Nominal Power ( $V_{MP}$ )	27.6V	27.8V	27.9V	28.1V	28.3V	28.5V	28.7V	28.9V
Current at Nominal Power ( $I_{MP}$ )	6.67A	6.77A	6.85A	6.94A	7.04A	7.09A	7.18A	7.27A

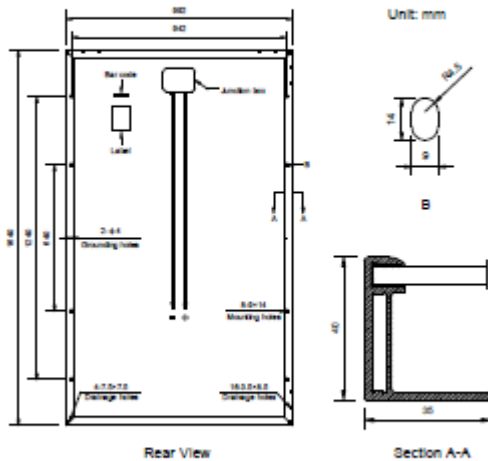
NOCT: Irradiance 800W/m<sup>2</sup>, Ambient temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s

MECHANICAL CHARACTERISTICS	
Cell type	Polycrystalline 156x156mm (6x6inches)
Number of cells	60 (6x10)
Module dimensions	1640x992x40mm (64.57x39.06x1.57inches)
Weight	19.5kg (40.8lbs)
Front cover	3.2mm (0.13inches) tempered glass with AR coating
Frame	Anodized aluminum alloy
Junction box	IP67, 3 diodes
Cable	4mm <sup>2</sup> (0.006inches <sup>2</sup> ), 900mm (35.43inches)
Connector	MC4 or MC4 compatible

TEMPERATURE CHARACTERISTICS	
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45°C±2°C
Temperature Coefficients of $P_{max}$	-0.41%/°C
Temperature Coefficients of $V_{OC}$	-0.31%/°C
Temperature Coefficients of $I_{SC}$	0.05%/°C

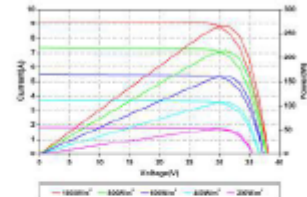
PACKAGING	
Standard packaging	26pcs/pallet
Module quantity per 20' container	312pcs
Module quantity per 40' container	728pcs(GP)/784pcs(HQ)

### ENGINEERING DRAWINGS

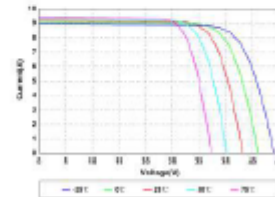


Specifications in this datasheet are subject to change without prior notice.

### IV CURVES



Current-Voltage and Power-Voltage Curves at Different Irradiances



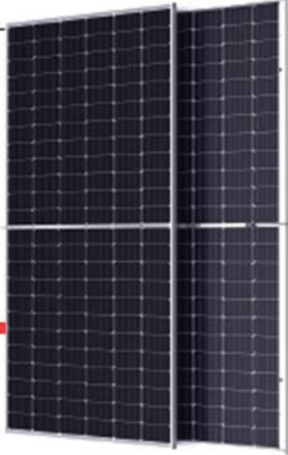
Current-Voltage Curves at Different Temperatures

Amerisolar and Amerisolar logo denoted with ® are registered trademarks of Worldwide Energy and Manufacturing USA Co., Ltd.

Panel bifacial.

Mono
Multi
Solutions

Draft



THE

# DUOMAX<sup>twin</sup>

BIFACIAL DUAL GLASS 144 LAYOUT MODULE

## 144 LAYOUT

MONOCRYSTALLINE MODULE

## 430-445W

POWER OUTPUT RANGE

## 20.2%

MAXIMUM EFFICIENCY




## 0~+5W





POSITIVE POWER TOLERANCE

Founded in 1997, Trina Solar is the world's leading total solution provider for solar energy. With local presence around the globe, Trina Solar is able to provide exceptional service to each customer in each market and deliver our innovative, reliable products with the backing of Trina as a strong, bankable brand. Trina Solar now distributes its PV products to over 100 countries all over the world. We are committed to building strategic, mutually beneficial collaborations with installers, developers, distributors and other partners in driving smart energy together.

Comprehensive Products and System Certificates

IEC61215/IEC61730/IEC61701/IEC62716  
 ISO 9001: Quality Management System  
 ISO 14001: Environmental Management System  
 ISO14064: Greenhouse Gases Emissions Verification  
 OHSAS 18001: Occupation Health and Safety Management System

PRODUCTS	POWER RANGE
TSM-DEGL7MC.20(16)	430-445W

**High power**

- Up to 445W front power and 20.2% module efficiency with half-cut and MBB (Multi Busbar) technology bringing more BOS savings
- Lower resistance of half-cut and good reflection effect of MBB ensure high power

---

**High reliability**

- Ensured PID resistance through cell process and module material control
- Resistant to salt, acid and ammonia
- Proven to be reliable in high temperature and humidity areas
- Certificated to fire class A
- Minimizes micro-crack and snail trails
- Certified to 5400 Pa positive load and 2400 Pa negative load

---

**High energy generation**

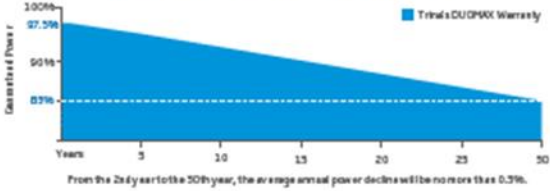
- Up to 25% additional power gain from back side depending on the albedo ;
- Excellent IAM and low light performance validated by 3rd party with cell process and module material optimization
- Lower temp coefficient (-0.35%) and NMOT bring more energy leading to lower LCOE
- Better anti-shading performance and lower operating temperature

---

**Easy to install**

- Frame design makes module compatible with all racking and installation methods
- Easy to handle and install as normal framed module during transportation

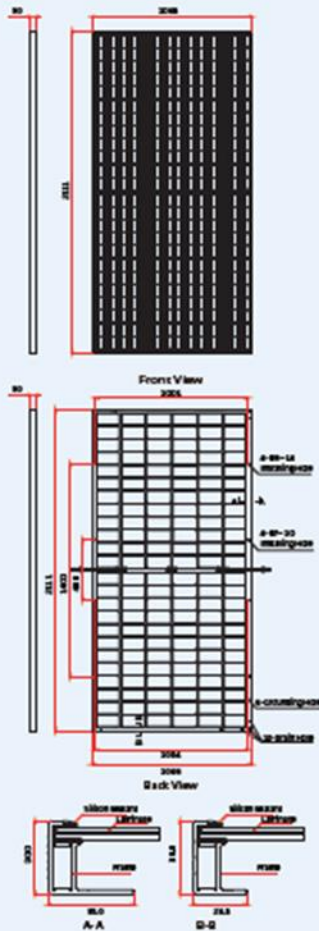
Trina Solar's DUOMAX Performance Warranty



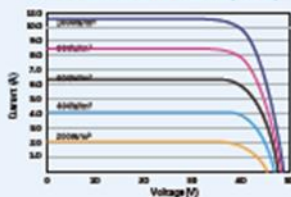
From the 2nd year to the 30th year, the average annual power decline will be no more than 0.3%.



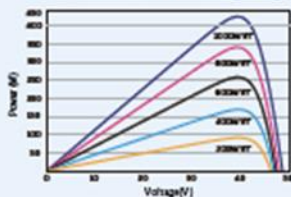
DIMENSIONS OF PV MODULE(mm)



I-V CURVES OF PV MODULE(435W)



P-V CURVES OF PV MODULE(435W)



ELECTRICAL DATA (STC)

Peak Power $P_{max}$ (Wp)*	430	435	440	445
Power Output Tolerance $P_{max}$ (W)	0 ~ +5			
Maximum Power Voltage $V_{mp}$ (V)	40.5	40.8	41.1	41.4
Maximum Power Current $I_{mp}$ (A)	10.62	10.67	10.71	10.75
Open Circuit Voltage $V_{oc}$ (V)	48.7	48.9	49.1	49.3
Short Circuit Current $I_{sc}$ (A)	11.20	11.24	11.28	11.32
Module Efficiency $\eta$ (%)	19.5	19.7	19.9	20.2

STC: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5.  
\*Please refer tolerance: ±2%.

Electrical characteristics with different rear side power gain (reference to 435Wp front)

Maximum Power $P_{max}$ (Wp)	457	470	500	522	544
Maximum Power Voltage $V_{mp}$ (V)	40.8	40.8	40.8	40.8	40.8
Maximum Power Current $I_{mp}$ (A)	11.20	11.74	12.27	12.80	13.34
Open Circuit Voltage $V_{oc}$ (V)	49.0	49.1	49.2	49.3	49.4
Short Circuit Current $I_{sc}$ (A)	11.80	12.36	12.93	13.49	14.05
Power gain	5%	10%	15%	20%	25%

Power Efficiency: 70±2%

ELECTRICAL DATA (NMOT)

Maximum Power $P_{max}$ (Wp)	325	329	333	337
Maximum Power Voltage $V_{mp}$ (V)	38.2	38.5	38.8	39.0
Maximum Power Current $I_{mp}$ (A)	8.51	8.55	8.58	8.63
Open Circuit Voltage $V_{oc}$ (V)	46.0	46.2	46.4	46.6
Short Circuit Current $I_{sc}$ (A)	9.02	9.05	9.08	9.12

NMOT: Irradiance at 900W/m<sup>2</sup>, Ambient Temperature 25°C, Wind Speed 1m/s.

MECHANICAL DATA

Solar Cells	Monocrystalline
Cell Orientation	144 cells (6 × 24)
Module Dimensions	2111 × 1046 × 30 mm (83.11 × 41.18 × 1.18 inches)
Weight	28.6 kg (63.1 lb)
Front Glass	2.0 mm (0.08 inches), High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant material	POE/EVA
Back Glass	2.0 mm (0.08 inches), Heat Strengthened Glass (With Grid Glass)
Frame	30mm(1.18 inches) Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP 68 rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm <sup>2</sup> (0.006 inches <sup>2</sup> ), Portrait: 290/290 mm(11.02/11.02 inches) Landscape: 1900/1900 mm(74.80/74.80 inches)
Connector	MCA EVO2 / TS4*

\*Please refer to regional data sheet for specified connector.

TEMPERATURE RATINGS

NMOT (Nominal Maximum Operating Temperature)	41°C (±3°C)
Temperature Coefficient of $P_{max}$	-0.35%/°C
Temperature Coefficient of $V_{oc}$	-0.25%/°C
Temperature Coefficient of $I_{sc}$	0.04%/°C

(Do not connect fuses in Combiner Box with two or more strings in parallel connection)

MAXIMUM RATINGS

Operational Temperature	-40 ~ +85°C
Maximum System Voltage	1500V DC (IEC)
	1500V DC (UL)
Max Series Fuse Rating	20A

WARRANTY

- 10 year Product Workmanship Warranty
- 30 year Power Warranty

(Please refer to product warranty for details)

PACKAGING CONFIGURATION

- Modules per box: 35 pieces
- Modules per 40' container: 770 pieces



**Technical Parameters:**

Rated Power	1000W		
Compatible with Solar Panels	36 cells/18V Vmp: 18-21V; Voc: 20-24V	60 cells/24V Vmp: 26-30V; Voc: 34-38V	72 cells/36V Vmp: 35-39V; Voc: 42-46V
DC Input Range	10.8-28V	20-45V	24-45V
MPPT Voltage	15-23VDC	24-34VDC	26-36VDC
DC MAX. Current	80A	60A	50A
AC Output	120VAC(90-140VAC) or 230VAC(190-260VAC)		
Frequency	50Hz/60Hz(Auto control)		
Power Factor	>97.5%		
THD	<5%		
Phase Shift	<2%		
Efficiency	120VAC(90-140VAC)		
Peak Efficiency	82%	87%	87%
Stable Efficiency	79%	84%	85%
Efficiency	230VAC(190-260VAC)		
Peak Efficiency	82%	87%	89%
Stable Efficiency	80%	85%	85%
Protection	Islanding; Short-circuit; Low Voltage; Over Voltage; Over Temperature Protection		
Working Temperature	-25°C-70°C		
Working Humidity	0%~90%RH non-condensing		
Waterproof	Indoor design		
Show	Luminous Diode(LED)		
Cooling	Fan		
Stand-by Power	<1W		
EMC	EN61000-6-3:2007 EN61000-6-1:2007		
Grid Disturbance	EN 50178+EN 62109-1+VDE0126-1-12		
Grid Detection	DIN VDE 1026 UL1741		

Resultado obtenido de la simulación de PVsyst.



Version 7.2.4

# PVsyst - Simulation report

## Grid-Connected System

Project: Instalación de SFV bifacial

Variant: Nueva variante de simulación

No 3D scene defined, no shadings

System power: 1200 Wp

Ciudad Universitaria - El Salvador



## Project: Instalación de SFV bifacial

Variant: Nueva variante de simulación

### PVsyst V7.2.4

VCO, Simulation date:  
19/07/21 16:20  
with v7.2.4

#### Project summary

**Geographical Site**

Ciudad Universitaria  
El Salvador

**Situation**

Latitude 13.72 °N  
Longitude -89.20 °W  
Altitude 695 m  
Time zone UTC-6

**Project settings**

Albedo 0.20

**Meteo data**

Ciudad Universitaria  
Meteonorm 8.0 (2000-2009), Sat=100% - Sintético

#### System summary

**Grid-Connected System**

No 3D scene defined, no shadings

**PV Field Orientation**

Fixed plane  
Tilt/Azimuth 13 / 0 °

**Near Shadings**

No Shadings

**User's needs**

Unlimited load (grid)

**System information****PV Array**

Nb. of modules 3 units  
Pnom total 1200 Wp

**Inverters**

Nb. of units 1 Unit  
Pnom total 1130 W  
Pnom ratio 1.062

#### Results summary

Produced Energy 2130 kWh/year Specific production 1775 kWh/kWp/year Perf. Ratio PR 80.36 %

#### Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Special graphs	6
P50 - P90 evaluation	7
Cost of the system	8
Financial analysis	9
CO <sub>2</sub> Emission Balance	11



## Project: Instalación de SFV bifacial

Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.2.4

VCD, Simulation date:  
19/07/21 16:20  
with v7.2.4

### General parameters

<b>Grid-Connected System</b>		<b>No 3D scene defined, no shadings</b>	
<b>PV Field Orientation</b>			
<b>Orientation</b>		<b>Sheds configuration</b>	<b>Models used</b>
Fixed plane		No 3D scene defined	Transposition Perez
Tilt/Azimuth	13 / 0 °		Diffuse Perez, Meteonom Circumsolar separate
<b>Horizon</b>		<b>Near Shadings</b>	<b>User's needs</b>
Free Horizon		No Shadings	Unlimited load (grid)

### PV Array Characteristics

<b>PV module</b>		<b>Inverter</b>	
Manufacturer	LG Electronics	Manufacturer	APsystems
Model	LG 400 N2T-A5	Model	YC1000-3-SAA
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	400 Wp	Unit Nom. Power	1.13 kWac
Number of PV modules	3 units	Number of inverters	1 units
Nominal (STC)	1200 Wp	Total power	1.1 kWac
Modules	3 Strings x 1 ln series	Operating voltage	16-55 V
<b>At operating cond. (50°C)</b>		Pnom ratio (DC:AC)	1.06
Pmpp	1098 Wp		
U mpp	38 V		
I mpp	29 A		
<b>Total PV power</b>		<b>Total inverter power</b>	
Nominal (STC)	1 kWp	Total power	1.1 kWac
Total	3 modules	Nb. of inverters	1 Unit
Module area	6.3 m <sup>2</sup>	Pnom ratio	1.06
Cell area	5.6 m <sup>2</sup>		

### Array losses

<b>Array Soiling Losses</b>		<b>Thermal Loss factor</b>		<b>DC wiring losses</b>				
Loss Fraction	3.0 %	Module temperature according to irradiance		Global array res.	21 mΩ			
		Uc (const)	29.0 W/m <sup>2</sup> K	Loss Fraction	1.5 % at STC			
		Uv (wind)	0.0 W/m <sup>2</sup> K/m/s					
<b>Module Quality Loss</b>		<b>Module mismatch losses</b>		<b>Strings Mismatch loss</b>				
Loss Fraction	-0.8 %	Loss Fraction	2.0 % at MPP	Loss Fraction	0.1 %			
<b>IAM loss factor</b>								
Incidence effect (IAM): Fresnel AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290								
0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.962	0.892	0.816	0.681	0.440	0.000



# Project: Instalación de SFV bifacial

Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.2.4

VCO, Simulation date:

19/07/21 16:20

with v7.2.4

## Main results

### System Production

Produced Energy 2130 kWh/year

Specific production

1775 kWh/kWp/year

Performance Ratio PR

80.36 %

### Economic evaluation

#### Investment

Global 1'043.12 USD

#### Yearly cost

Annuitities

0.00 USD/yr

#### LCOE

Energy cost

0.08 USD/kWh

Specific 0.87 USD/Wp

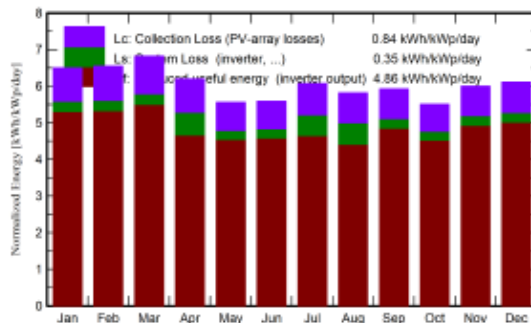
Run. costs

-250.00 USD/yr

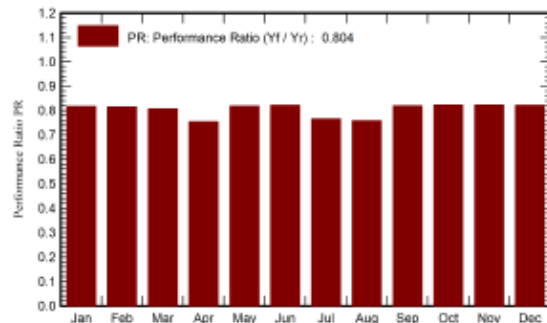
Payback period

4.2 years

### Normalized productions (per installed kWp)



### Performance Ratio PR



### Balances and main results

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	175.8	41.40	24.49	201.5	192.0	208.1	197.8	0.818
February	167.0	51.35	25.46	183.4	174.7	188.7	179.3	0.815
March	203.7	59.14	26.20	211.4	201.0	215.6	204.8	0.807
April	188.5	69.73	26.26	185.8	176.0	190.5	168.1	0.754
May	181.0	83.24	25.90	172.3	162.9	178.6	169.4	0.819
June	180.3	71.97	24.91	167.6	158.0	174.2	165.2	0.822
July	201.7	68.04	25.67	188.3	177.7	194.2	173.1	0.766
August	185.6	69.50	25.38	180.3	170.5	186.1	164.2	0.759
September	174.6	67.76	24.37	177.8	168.5	184.3	174.9	0.819
October	160.5	69.23	24.56	170.8	162.1	177.8	168.7	0.823
November	160.1	54.35	24.14	180.1	171.1	187.2	177.8	0.823
December	163.3	46.70	24.58	189.4	180.3	196.6	166.7	0.821
Year	2142.1	752.41	25.16	2208.8	2094.8	2281.9	2130.0	0.804

### Legends

GlobHor Global horizontal irradiation

DiffHor Horizontal diffuse irradiation

T\_Amb Ambient Temperature

GlobInc Global incident in coll. plane

GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings

EArray Effective energy at the output of the array

E\_Grid Energy injected into grid

PR Performance Ratio

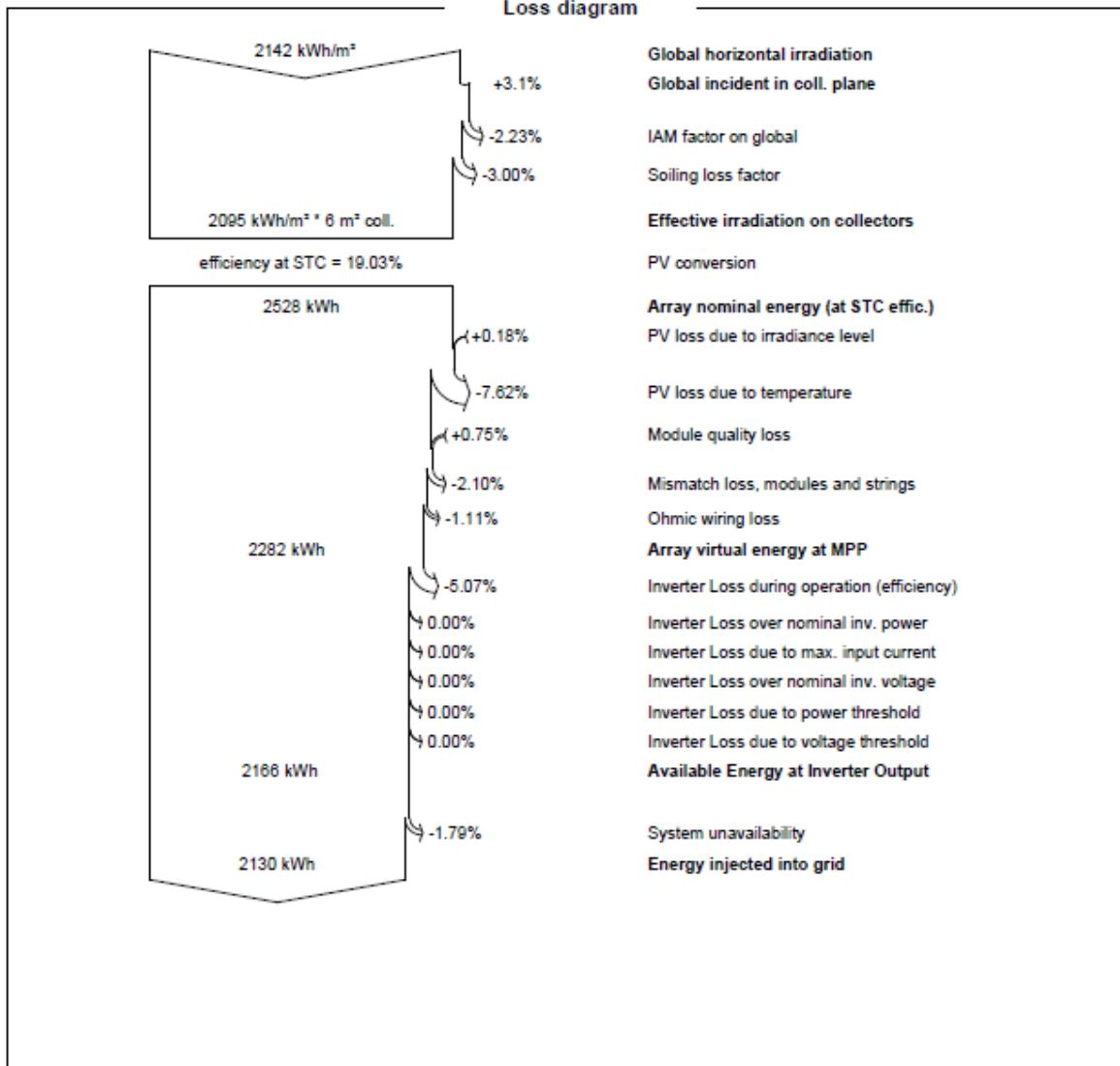


# Project: Instalación de SFV bifacial

Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.2.4  
VCO, Simulation date:  
19/07/21 16:20  
with v7.2.4

## Loss diagram





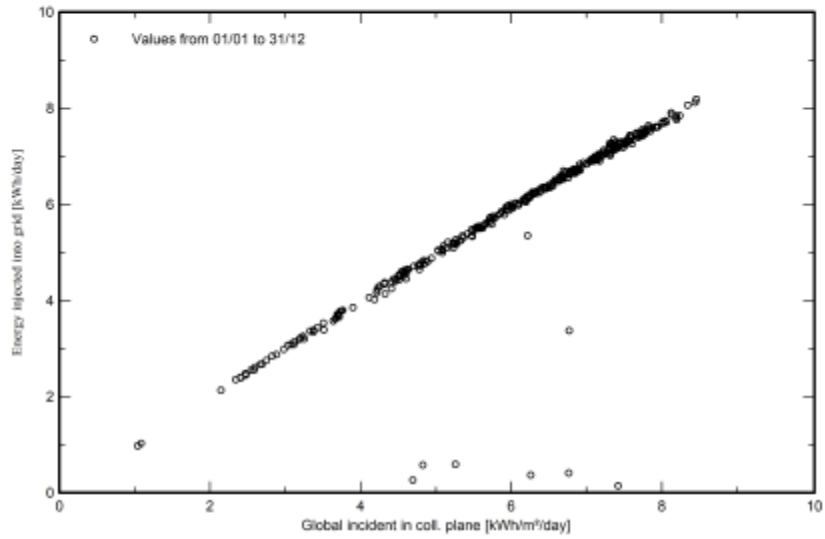
PVsyst V7.2.4  
VCO, Simulation date:  
19/07/21 16:20  
with v7.2.4

### Project: Instalación de SFV bifacial

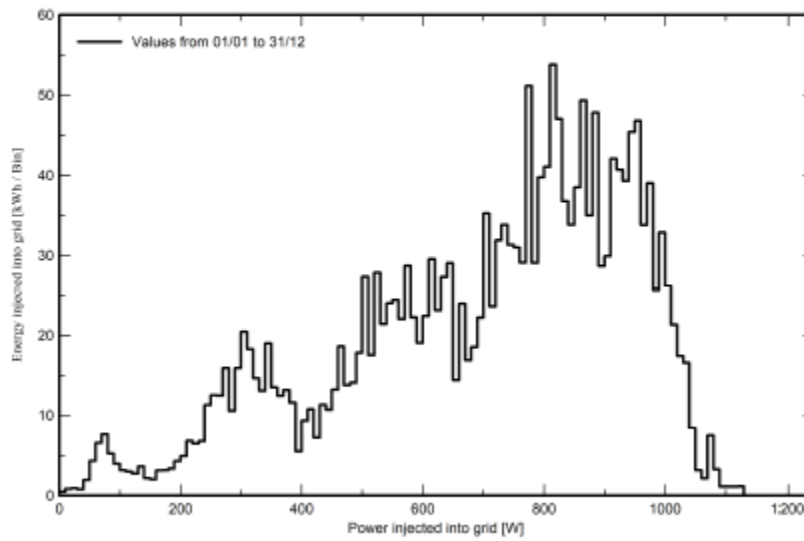
Variant: Nueva variante de simulación

#### Special graphs

##### Diagrama entrada/salida diaria



##### Distribución de potencia de salida del sistema





# Project: Instalación de SFV bifacial

Variant: Nueva variante de simulación

## PVsyst V7.2.4

VC0, Simulation date:  
19/07/21 16:20  
with v7.2.4

### P50 - P90 evaluation

#### Meteo data

Meteo data ~~Meteonorm~~ Meteonorm 8.0 (2000-2009), Sat=100%  
Kind Not defined  
Year-to-year variability(Variance) 0.5 %  
Specified Deviation

#### Global variability (meteo + system)

Variability (Quadratic sum) 1.9 %

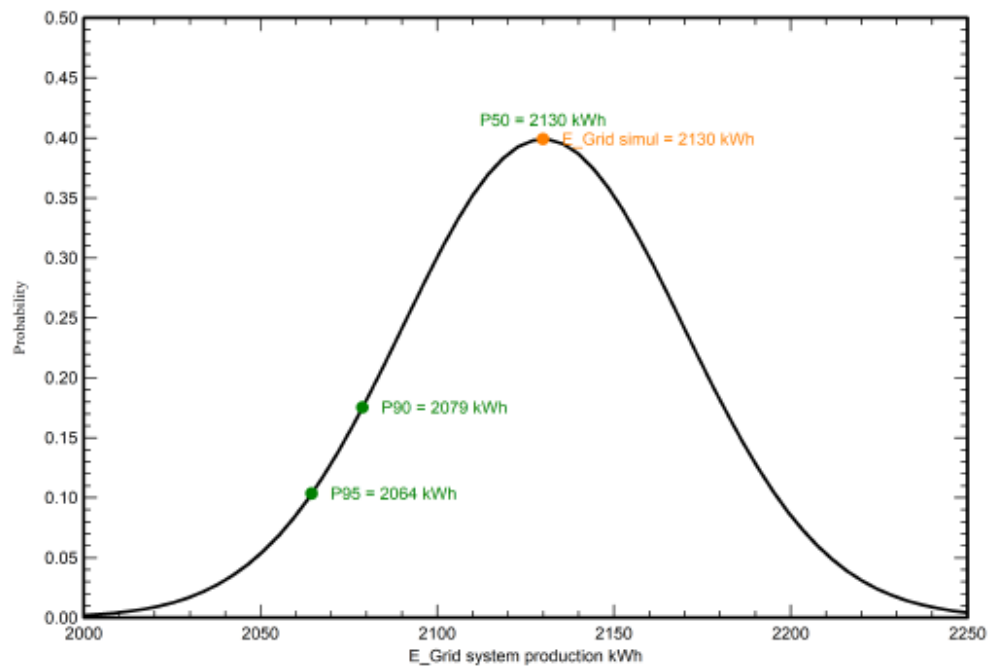
#### Simulation and parameters uncertainties

PV module modelling/parameters 1.0 %  
Inverter efficiency uncertainty 0.5 %  
Soiling and mismatch uncertainties 1.0 %  
Degradation uncertainty 1.0 %

#### Annual production probability

Variability 40 kWh  
P50 2130 kWh  
P90 2079 kWh  
P95 2064 kWh

### Probability distribution





Project: Instalación de SFV bifacial

Variante: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.2.4

VCO, Simulation date:  
19/07/21 16:20  
with v7.2.4

Cost of the system

Installation costs

Item	Quantity units	Cost USD	Total USD
PV modules			
LG 400 N2T-A5	3	104.00	312.00
Inverters			
YC1000-3-SAA	1	600.00	600.00
Installation			
Global installation cost per module	3	35.00	105.00
Global installation cost per inverter	1	6.12	6.12
Transport	1	20.00	20.00
Total			1043.12
Depreciable asset			912.00

Operating costs

Item	Total USD/year
Subsidies	-250.00
Total (OPEX)	-250.00

System summary

Total installation cost	1043.12 USD
Operating costs	-250.00 USD/year
Produced Energy	2130 kWh/year
Cost of produced energy (LCOE)	0.078 USD/kWh



PVsyst V7.2.4

VCO, Simulation date:  
19/07/21 16:20  
with v7.2.4

Project: Instalación de SFV bifacial

Variant: Nueva variante de simulación

Financial analysis

<b>Simulation period</b>			
Project lifetime	20 years	Start year	2022
<b>Income variation over time</b>			
Inflation			0.00 %/year
Production variation (aging)			0.00 %/year
Discount rate			0.00 %/year
<b>Income dependent expenses</b>			
Income tax rate			0.00 %/year
Other income tax			0.00 %/year
Dividends			0.00 %/year
<b>Financing</b>			
Own funds			1'043.00 USD
<b>Electricity sale</b>			
Feed-in tariff			0.15 USD/kWh
Duration of tariff warranty			20 years
Annual connection tax			365.00 USD/kWh
Annual tariff variation			+0.2 %/year
Feed-in tariff decrease after warranty			50.00 %
<b>Return on investment</b>			
Payback period			4.2 years
Net present value (NPV)			3'957.00 USD
Return on investment (ROI)			379.3 %

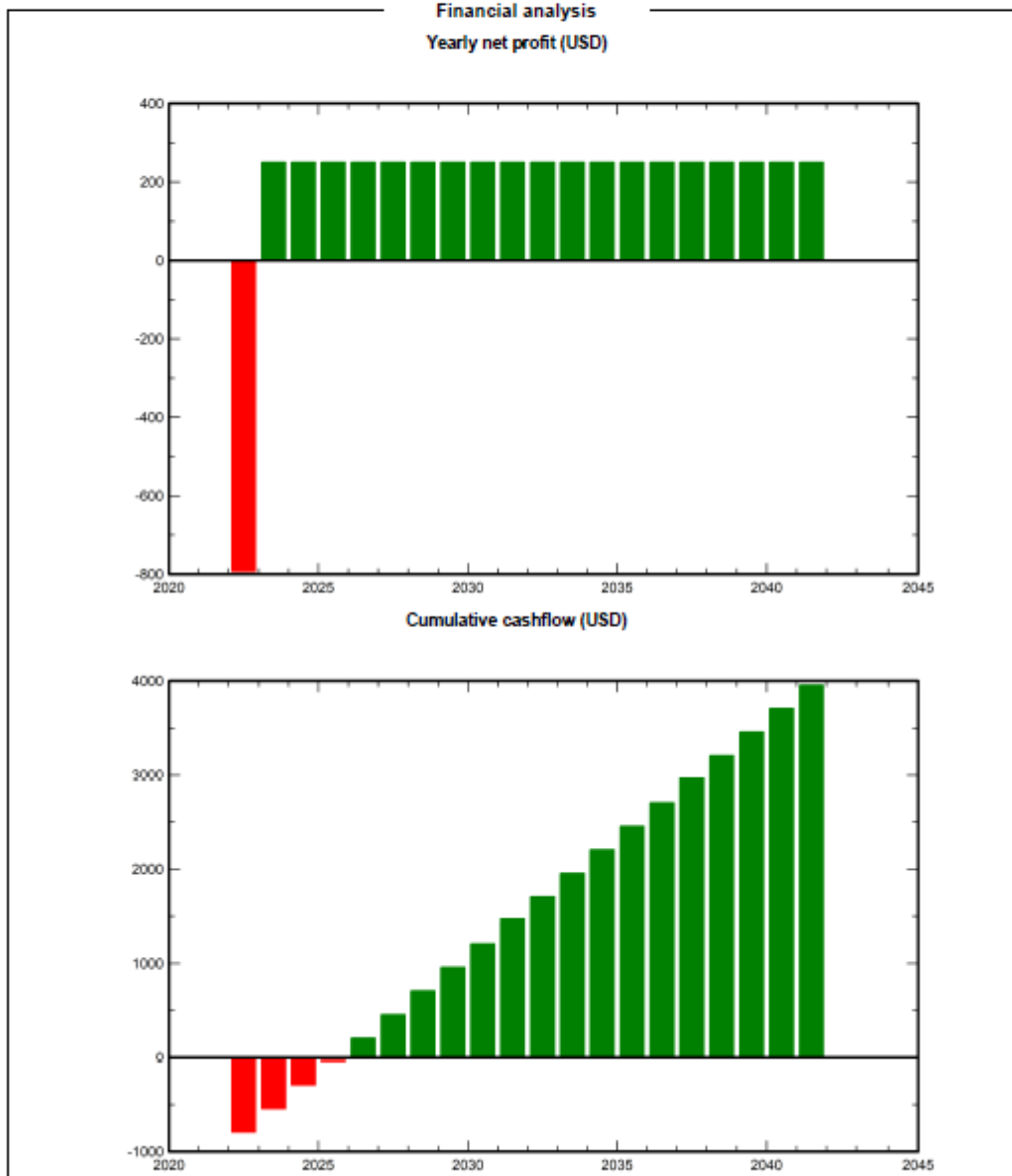
Detailed economic results (USD)

	Electricity sale	Run. costs	Deprec. allow.	Taxable income	Taxes	After-tax profit	Cumul. profit	% amort.
2022	0	-250	0	250	0	250	-793	24.0%
2023	0	-250	0	250	0	250	-543	47.9%
2024	0	-250	0	250	0	250	-293	71.9%
2025	0	-250	0	250	0	250	-43	95.9%
2026	0	-250	0	250	0	250	207	119.8%
2027	0	-250	0	250	0	250	457	143.8%
2028	0	-250	0	250	0	250	707	167.8%
2029	0	-250	0	250	0	250	957	191.7%
2030	0	-250	0	250	0	250	1'207	215.7%
2031	0	-250	0	250	0	250	1'457	239.7%
2032	0	-250	0	250	0	250	1'707	263.6%
2033	0	-250	0	250	0	250	1'957	287.6%
2034	0	-250	0	250	0	250	2'207	311.6%
2035	0	-250	0	250	0	250	2'457	335.5%
2036	0	-250	0	250	0	250	2'707	359.5%
2037	0	-250	0	250	0	250	2'957	383.5%
2038	0	-250	0	250	0	250	3'207	407.4%
2039	0	-250	0	250	0	250	3'457	431.4%
2040	0	-250	0	250	0	250	3'707	455.4%
2041	0	-250	0	250	0	250	3'957	479.3%
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>-6'000</b>	<b>0</b>	<b>6'000</b>	<b>0</b>	<b>6'000</b>	<b>3'957</b>	<b>479.3%</b>



PVsyst V7.2.4  
VCO, Simulation date:  
19/07/21 16:20  
with v7.2.4

Project: Instalación de SFV bifacial  
Variant: Nueva variante de simulación





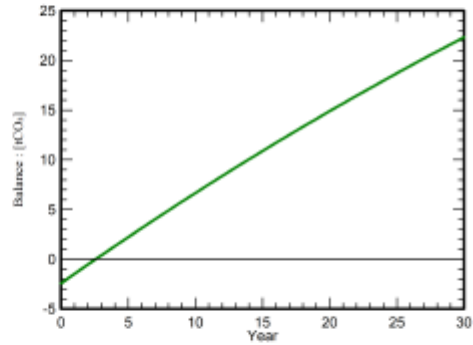
**PVsyst V7.2.4**  
 VCO, Simulation date:  
 19/07/21 16:20  
 with v7.2.4

Project: Instalación de SFV bifacial  
 Variant: Nueva variante de simulación

**CO<sub>2</sub> Emission Balance**

**Total:** 22.3 tCO<sub>2</sub>  
**Generated emissions**  
**Total:** 2.44 tCO<sub>2</sub>  
 Source: Detailed calculation from table below:  
**Replaced Emissions**  
**Total:** 28.6 tCO<sub>2</sub>  
 System production: 2129.97 kWh/yr  
 Grid Lifecycle Emissions: 447 gCO<sub>2</sub>/kWh  
 Source: IEA List  
 Country: Mexico  
 Lifetime: 30 years  
 Annual degradation: 1.0 %

**Saved CO<sub>2</sub> Emission vs. Time**



**System Lifecycle Emissions Details**

Item	LCE	Quantity	Subtotal
			[kgCO <sub>2</sub> ]
Modules	1713 kgCO <sub>2</sub> /kWp	1.20 kWp	2055
Supports	2.98 kgCO <sub>2</sub> /kg	30.0 kg	89.4
Inverters	295 kgCO <sub>2</sub> /units	1.00 units	295