

ESTUDIO DE PÉRDIDAS EN PANELES FOTOVOLTAICOS POR INCLINACIÓN,
ORIENTACIÓN Y SOMBRAS

TATIANA ACOSTA MARTÍNEZ

JEHISSON FERNEL ARENAS EZENARRO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA

2015

ESTUDIO DE PÉRDIDAS EN PANELES FOTOVOLTAICOS POR INCLINACIÓN,
ORIENTACIÓN Y SOMBRAS

TATIANA ACOSTA MARTÍNEZ
JEHISSON FERNEL ARENAS EZENARRO

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Electrónico

Directora:
MÓNICA ANDREA BOTERO LONDOÑO
Ingeniera Electrónica, Ph.D

Co-Directora:
MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS
Ingeniera Electrónica, Ph.D ©

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA

2015

DEDICATORIA

A mis padres Ilce Martínez y Alvaro Acosta por complacerme en todos mis caprichos, por todo el apoyo y las enseñanzas que me han brindado y lo más importante el amor incondicional que me transmiten a diario.

A mis hermanos Christian Javier y Alvaro Javier por su comprensión y compañía en todo momento.

A toda mi familia que en general me han colaborado en todo lo que he llegado a necesitar, por esa unión y ese amor que nos dejó como legado mis abuelitos, que desde el cielo nos protegen.

A Dios porque sin él no hubiera sido posible todo este camino que he podido recorrer y los logros que he llegado a obtener.

A Jehisson Arenas por su paciencia, tolerancia, comprensión, compañía y todo el amor que me ha brindado por estos años logrando así una meta más juntos.

TATIANA ACOSTA MARTÍNEZ

DEDICATORIA

*A mi Madre Nelsy Ezenarro Contreras y mi Padre Ramon Emilio Arenas
Monsalve, por el amor incondicional que siempre me han expresado.*

*A mi Abuela Amira y mi Nono Clímaco, por esos hermosos momentos que
llegamos a compartir, al igual que por cada una de las enseñanzas transmitidas
en vida.*

*A mis Hermanas Naya Durley y Dalgy Melissa por ese bello acompañamiento
durante todos estos años de mi vida.*

*A mi Sobrina Brenda Natalia, por esa Luz que ha traído a nuestra familia y por
esas sonrisas que logra sacarme de manera espontánea.*

*A cada una de esas personas con las que me he encontrado en el camino de la
vida, por cada pincelada de sabiduría que me han entregado.*

JEHISSON FERNEL ARENAS EZENARRO

AGRADECIMENTOS

Al Universo por todas las Bendiciones y Luz emanadas en nuestras vidas.

A la Universidad Industrial de Santander, particularmente a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones por su formación académica.

A las profesoras Mónica Andrea Botero y María Alejandra Mantilla por el tiempo dedicado, por su acompañamiento y asesoría en el desarrollo del proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
2. JUSTIFICACIÓN	20
3. OBJETIVOS	21
3.1 OBJETIVO GENERAL	21
3.1.1 Objetivos específicos	21
4. MARCO TEÓRICO.....	22
4.1 CELDA SOLAR.....	22
4.1.1 Parámetros fundamentales.	23
4.1.2 Tipos de conexión	23
4.2 CURVA I-V.....	24
4.3 INCLINACIÓN, ORIENTACIÓN Y SOMBRAS.....	25
5. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	30

6. ANÁLISIS EXPERIMENTAL.....	35
7. ANÁLISIS DE SOMBRAS	62
7.1 ANÁLISIS DE SOMBRAS PARA UN SOLO PANEL FOTOVOLTAICO	63
7.2 ANÁLISIS DE SOMBRAS PARA DOS PANELES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS EN SERIE	82
8. CONCLUSIONES.....	101
9. RECOMENDACIONES	103
BIBLIOGRAFÍA.....	104
ANEXOS.....	105

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Pérdidas límite	29
Tabla 2. Síntesis de valores obtenidos de 8-9 AM.....	36
Tabla 3. Comparación de 8-9 AM	36
Tabla 4. Síntesis de valores obtenidos de 9-10 AM.....	39
Tabla 5. Comparación de 9-10 AM	40
Tabla 6. Síntesis de valores obtenidos de 10-11 AM.....	42
Tabla 7. Comparación de 10-11 AM	43
Tabla 8. Síntesis de valores obtenidos de 11 AM -12 M.....	45
Tabla 9. Comparación de 11 AM -12 M	45
Tabla 10. Síntesis de valores obtenidos de 12-1 PM.....	47
Tabla 11. Comparación de 12-1 PM	48
Tabla 12. Síntesis de valores obtenidos de 1-2 PM.....	50
Tabla 13. Comparación de 1-2 PM	51
Tabla 14. Síntesis de valores obtenidos de 2-3 PM.....	53
Tabla 15. Comparación de 2-3 PM	54
Tabla 16. Síntesis de valores obtenidos de 3-4 PM.....	56
Tabla 17. Comparación de 3-4 PM	56
Tabla 18. Síntesis de valores obtenidos de 4-5 PM.....	58
Tabla 19. Comparación de 4-5 PM	59
Tabla 20. Síntesis final.....	61
Tabla 21. Resumen de los valores obtenidos para un solo panel.....	80
Tabla 22. Resumen de los valores obtenidos para dos paneles conectados en serie	99

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura básica de una celda solar con juntura p-n	22
Figura 2. Curva I-V.....	24
Figura 3. Inclinación y orientación de los módulos.....	27
Figura 4. Modelo estructural	30
Figura 5. Estructura implementada	32
Figura 6. Instalación de paneles fotovoltaicos en el Parque Tecnológico Guatiguará.....	34
Figura 7. Curvas características para $\beta=10^\circ$ y $\alpha=315^\circ$	38
Figura 8. Curvas características para $\beta=10^\circ$ y $\alpha=270^\circ$	41
Figura 9. Curvas características para $\beta=10^\circ$ y $\alpha=315^\circ$	44
Figura 10. Curvas características para $\beta=4^\circ$ y $\alpha=315^\circ$	47
Figura 11. Curvas características para $\beta=10^\circ$ y $\alpha=315^\circ$	49
Figura 12. Curvas características para $\beta=10^\circ$ y $\alpha=0^\circ$	52
Figura 13. Curvas características para $\beta=7^\circ$ y $\alpha=45^\circ$	55
Figura 14. Curvas características para $\beta=10^\circ$ y $\alpha=45^\circ$	57
Figura 15. Curvas características para $\beta=10^\circ$ y $\alpha=0^\circ$	60
Figura 16. Diodos de bypass	62
Figura 17. Curvas características del panel fotovoltaico sin sombra	63
Figura 18. Sombra en la primera fila del panel	64
Figura 19. Curvas características para sombra en la primera fila del panel.....	65
Figura 20. Sombra en la quinta fila del panel.....	65
Figura 21. Curvas características para sombra en la quinta fila del panel	66
Figura 22. Sombra en la primera columna del panel	67
Figura 23. Curvas características para sombra en la primera columna del panel	67
Figura 24. Sombra en la cuarta columna del panel.....	68
Figura 25. Curvas características para sombra en la cuarta columna del panel	69
Figura 26. Sombra en la tercera fila y columna.....	69
Figura 27. Curvas características con sombra en la tercera fila y columna	70
Figura 28. Sombra en diagonal.....	71
Figura 29. Curvas características para sombra en diagonal	71
Figura 30. Sombra en tres celdas horizontales.....	72
Figura 31. Curvas características con sombra de tres celdas horizontales	72
Figura 32. Sombra en tres celdas verticales	73

Figura 33. Curvas características con sombra en tres celdas verticales.....	74
Figura 34. Sombra en una esquina.....	74
Figura 35. Curvas características con sombra en una esquina	75
Figura 36. Sombra en una celda en la mitad	76
Figura 37. Curvas características con sombra en una sola celda en la mitad ..	76
Figura 38. Sombra con hojas de árboles	77
Figura 39. Curvas características para sombra con hojas de árboles.....	77
Figura 40. Sombra producida por una edificación cercana.....	78
Figura 41. Curvas características para sombra producida por una edificación cercana.....	79
Figura 42. Comparativa de corrientes y factor forma para un solo panel.....	80
Figura 43. Comparativa de tensiones y potencia para un solo panel.....	81
Figura 44. Curvas características de dos paneles fotovoltaicos conectados en serie	82
Figura 45. Sombra horizontal en la primera fila para un solo panel	83
Figura 46. Curvas características para sombra en la primera fila en un solo panel	84
Figura 47. Sombra en la quinta fila en un solo panel	84
Figura 48. Curvas características para sombra en la quinta fila en un solo panel	85
Figura 49. Sombra en la primera columna para un solo panel	86
Figura 50. Curvas características para sombra en la primera columna en un solo panel.....	86
Figura 51. Sombra en la cuarta columna para un solo panel.....	87
Figura 52. Curvas características para sombra en la cuarta columna en un solo panel	88
Figura 53. Sombra en la tercera fila y columna para un solo panel	88
Figura 54. Curvas características para sombra en la tercera fila y columna en un solo panel.....	89
Figura 55. Sombra en diagonal para un solo panel	90
Figura 56. Curvas características con sombra en diagonal en un solo panel ...	90
Figura 57. Sombra en tres celdas horizontales para un solo panel	91
Figura 58. Curvas características con sombra en tres celdas horizontales en un solo panel.....	91
Figura 59. Sombra en tres celdas verticales para un solo panel.....	92
Figura 60. Curvas características con sombra en tres celdas verticales en un solo panel.....	93
Figura 61. Sombra en una esquina para un panel	93
Figura 62. Curvas características con sombra en una esquina en un solo panel	94
Figura 63. Sombra en una celda en la mitad de un panel.....	95

Figura 64. Curvas características con sombra en una celda en la mitad de un panel	95
Figura 65. Sombra con hojas de árboles en un panel.....	96
Figura 66. Curvas características con sombra de hojas de árboles en un panel	96
Figura 67. Sombra producida por una edificación cercana en un panel	97
Figura 68. Curvas características con sombra producida por una edificación cercana en un panel.....	97
Figura 69. Comparativa de corrientes y factor forma para dos paneles conectados en serie	100
Figura 70. Comparativa de tensiones y potencia para dos paneles conectados en serie.....	100

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Características del panel fotovoltaico SP50M	105
Anexo B. Perspectiva Estructural de los paneles solares instalados en el Parque Tecnológico Guatiguará	106
Anexo C. Características del panel fotovoltaico UP-M250P	107
Anexo D. Síntesis de resultados obtenidos para el análisis de inclinación y orientación	108

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE PÉRDIDAS EN PANELES FOTOVOLTAICOS POR INCLINACIÓN, ORIENTACIÓN Y SOMBRAS*

AUTORES: TATIANA ACOSTA MARTÍNEZ, JEHISSON FERNEL ARENAS EZENARRO**

PALABRAS CLAVE: Irradiancia, Panel Fotovoltaico, Potencia.

DESCRIPCIÓN:

El mundo de hoy exige la implementación de energías renovables, hace parte del plan de desarrollo global y de sustentabilidad. La energía solar es una de las energías alternativas más populares debido a su carácter prácticamente inagotable y a que no genera residuos. No obstante, su intermitencia y el nulo control del hombre sobre este recurso generan grandes incertidumbres en el uso de esta fuente de energía.

Todo análisis que se realizó a un módulo fotovoltaico se inicia generalmente por su curva I-V, ya que esta define sus puntos característicos, especialmente el de máxima transferencia de potencia.

Este proyecto trata del estudio de los efectos que se presentan en las curvas características de corriente vs tensión (I_V) y potencia vs tensión (P_V) de paneles solares fotovoltaicos, según la variación en el ángulo de inclinación y orientación, además de la presencia de posibles sombras.

Asimismo se diseñó una base para la implementación de paneles solares fotovoltaicos en el Parque Tecnológico Guatiguará, con el fin de determinar la inclinación más adecuada, el efecto de la orientación y de las sombras por elementos tales como hojas de árboles u objetos cercanos.

Se planteó un análisis de eficiencia energética a partir de los valores obtenidos para una instalación fotovoltaica sometida a ciertas condiciones de operación, los resultados arrojados se clasificaron por hora de acuerdo a la jornada de estudio y se definieron los rangos de operación más óptimos en relación a la máxima potencia lograda.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Electrónica. Directora: Ph.D. Mónica Andrea Botero Londoño, Co-Directora: MI. María Alejandra Mantilla Villalobos.

ABSTRACT

TITLE: MISSED'S STUDY IN PHOTOVOLTAIC PANELS FOR INCLINATION, ORIENTATION AND SHADOWS*

AUTHORS: TATIANA ACOSTA MARTÍNEZ, JEHISSON FERNEL ARENAS EZENARRO**

KEYWORDS: Irradiance, Photovoltaic Panel, Power.

DESCRIPTION:

Today's world demands the implementation of renewable energy, it's part of the overall development plan and sustainability. The solar energy is one of the most popular alternatives energies because of its inexhaustible character and doesn't make waste. However, its intermittence and the not man's control over this resource generate big uncertainties in the use of this power source.

Any analysis that was performed to a photovoltaic module begins generally by his curve I-V, because this defines his characteristics points, especially the maximum transfer of energy.

This project is about the study of the effects presented in the characteristics curves of current Vs tension (C_T) and potency Vs tension (P_T) of photovoltaic solar panels, according to variation in the angle of inclination and orientation, besides the presence of possible shadows.

Also, it designed a base for the implementation of photovoltaic solar panels in the technological park Guatiguará, with the final purpose to determine the most appropriate inclination, the effect of orientation and the shadows by elements such as leafs or near objects.

It was set an analysis of energy efficiency from the values obtained to a photovoltaic installation under certain conditions of operation. The results classified per hour according to the working day of study and was defined the most optimal ranges of operation in relation to the maximum power loaded.

* Thesis.

** Physical-Mechanic Engineering Faculty. Electronic Engineering School. Director: Ph. D. Mónica Andrea Botero Londoño, Co-Director: Ml. María Alejandra Mantilla Villalobos.

INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica se basa en la captación de energía solar y su transformación en energía eléctrica por medio de módulos fotovoltaicos.

La generación de electricidad empleando celdas solares comenzó con aplicaciones espaciales, trasladando su utilidad rápidamente a la tierra y hoy día hay tanto en la ciudad como en el campo, en zonas remotas. Con el tiempo su uso se ha ido diversificando hasta el punto que actualmente resultan de gran interés las instalaciones solares en conexión con la red eléctrica¹.

En Colombia la producción de energía primaria proviene principalmente de la hidroelectricidad, por la abundancia de agua en la mayoría de zonas del país, y en un segundo lugar de los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), fuentes que contaminan, generan desequilibrio ecológico y no garantizan a largo plazo el cubrimiento total de la demanda energética.

Por eso el Gobierno Nacional en los últimos años ha comenzado a promover el desarrollo y aplicación de tecnologías alternativas de producción de energía, que funcionen con recursos renovables, para solucionar el problema de la crisis energética mundial y contribuir a un medio ambiente más limpio².

Asimismo el Congreso de Colombia decretó la Ley No. 1715 del 13 de mayo de 2014, por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional³.

¹ MENDEZ MUÑOZ, Javier María. CUERVO GARCIA, Rafael. Energía Solar Fotovoltaica. 2ª Edición. Madrid: Fundación Confemetal. 2007.

² MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL REPÚBLICA DE COLOMBIA. Centro Virtual de Noticias. Colombia una potencia en energías alternativas. {En línea}. Universidad de Antioquia. [Bogotá: Colombia] Mineducación, 2014. {Citado: 31 de Julio de 2014} disponible en Internet: <http://mineducacion.gov.co/cvn/1665/article-117028.htm>.

³ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1715 (13 de Mayo de 2014) Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Diario Oficial. Bogotá, 2014.

La extensión a gran escala de esta aplicación requiere el desarrollo de métodos de ingeniería específicos, que permitan evaluar sus características y rendimientos en el conjunto del sistema eléctrico. Debido a esto se precisa el estudio para el control de instalaciones fotovoltaicas de modo eficiente exigiendo un conocimiento concreto de la característica I-V de los módulos fotovoltaicos.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Debido a la entrada en vigencia de la Ley No. 1715 del 13 de Mayo de 2014, los colombianos debemos estar preparados para el aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias⁴.

El control de instalaciones fotovoltaicas de modo eficiente, exige un conocimiento preciso de la curva característica I-V de los módulos fotovoltaicos, ya que esta permite situar el punto de máxima transferencia de potencia de los paneles. En consecuencia, este estudio buscará evidenciar la influencia de cada uno de los factores que afectan de manera significativa la eficiencia de una instalación fotovoltaica, como lo son la inclinación, orientación y la presencia de posibles sombras, con el fin de poder realizar previsiones acertadas de la producción energética.

⁴ Ibid., p. 18.

2. JUSTIFICACIÓN

La energía solar fotovoltaica es una de las fuentes más prometedoras de las energías renovables en el mundo. Comparada con las fuentes no renovables, las ventajas son claras: no contamina el medio ambiente, es una tecnología limpia, no perjudica la calidad del suelo ni del aire. Además contribuye al desarrollo sostenible, permitiendo también aprovechar la energía en zonas donde no llega la red eléctrica⁵.

No consume combustibles fósiles, es una fuente inagotable, ofrece una disponibilidad operativa excelente, vida útil extensa, resisten condiciones climáticas extremas, tales como granizo, viento, temperatura y humedad. No existe una dependencia de los países productores de combustibles. También se puede aumentar la potencia mediante la incorporación de nuevos módulos fotovoltaicos⁶.

En este sentido, se considera que en el país el reto más importante para la implementación de este tipo de energías está en mejorar los aspectos regulatorios y a partir de estudios diseñar el mecanismo que posibilite comprender cómo se va a generar de manera eficiente la utilización de los recursos renovables a pequeña o gran escala.

⁵ SANCHEZ MAZA, Miguel Ángel. Energía Solar Fotovoltaica. México. Limusa. 2008.

⁶ LYNN, Paul A. Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics. United Kingdom. Wiley. 2010.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar las pérdidas y los efectos en las curvas características en paneles fotovoltaicos ubicados en el Parque Tecnológico de Guatiguará (PTG) según las variables de inclinación, orientación y condiciones no uniformes de irradiancia debidas a posibles sombras.

3.1.1 Objetivos específicos. El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Diseñar un soporte para la instalación de paneles solares fotovoltaicos que permita variar su inclinación y orientación en al menos dos puntos.
- Instalar los paneles fotovoltaicos con los que cuenta el grupo GISEL, situándolos en el techo de un edificio del Parque Tecnológico de Guatiguará (PTG).
- Modificar la inclinación y orientación de los paneles fotovoltaicos para determinar variaciones en la curva I-V.
- Determinar el efecto en la curva I-V debido a factores externos que podrían disminuir la eficiencia del panel, tales como hojas de árboles u objetos cercanos.

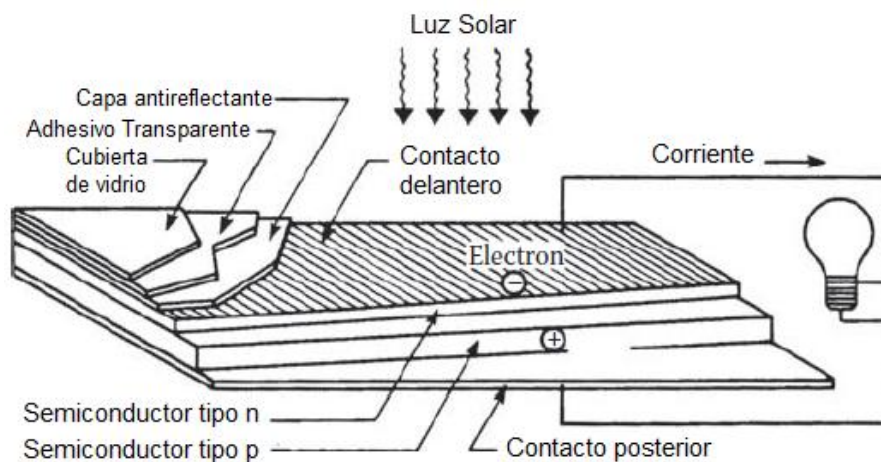
4. MARCO TEÓRICO

4.1 CELDA SOLAR

El elemento principal de cualquier instalación de energía solar es el panel fotovoltaico, que está conformado por celdas solares, las cuales se caracterizan por convertir directamente en electricidad los fotones provenientes de la luz del sol. Su funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico.

Básicamente, una celda solar es una juntura p-n fabricada en una capa semiconductor, donde la luz es absorbida por electrones excitados de la banda de valencia del semiconductor a la banda de conducción, a través del volumen de la juntura (ver Figura 1). Los fotones con energía mayor que la banda de energía prohibida del semiconductor son absorbidos y crean pares electrón-hueco proporcionales a la radiación incidente. Bajo la influencia de los campos eléctricos internos de la juntura p-n, estos portadores son arrastrados y crean una corriente, y una tensión en la carga conectada exteriormente⁷.

Figura 1. Estructura básica de una celda solar con juntura p-n



Fuente: COTA Alma, FOSTER, Robert y GHASSEMI, Majid. Solar Energy: Renewable Energy and the Environment.

⁷ COTA Alma, FOSTER, Robert y GHASSEMI, Majid. Solar Energy: Renewable Energy and the Environment. Florida-USA. CRC Press. 2010.

4.1.1 Parámetros fundamentales.

- ✧ *Corriente de cortocircuito*: máximo valor de corriente que puede circular por la celda. Se da cuando sus terminales están cortocircuitados.
- ✧ *Tensión de circuito abierto*: la máxima tensión que se obtiene en los extremos de la celda solar, que se da cuando no está conectada a ninguna carga. Es una característica de los materiales con el que está construida la celda.
- ✧ *Punto de máxima potencia*: es el punto para el cual la potencia entregada es máxima, obteniéndose el mayor rendimiento posible del panel.
- ✧ *Factor de forma*: es el cociente entre la máxima potencia que puede entregar la celda y el producto de la tensión de circuito abierto y corriente en cortocircuito.

4.1.2 Tipos de conexión. Las celdas fotovoltaicas conectadas entre sí son montadas en un módulo o panel solar; asimismo, un amplio conjunto de estos paneles solares fotovoltaicos, adecuadamente dispuestos, formarán la central solar. Las características eléctricas de estas instalaciones vienen determinadas por el número y forma de conexión de las celdas⁸.

- ✧ *Conexión en serie*: conectadas de forma que el lado P, este conectado con el lado N de otra celda, y así sucesivamente, quedando cada extremo con un lado N y otro P. Las tensiones generadas de cada celda se suman, la corriente es igual para todas las celdas.
- ✧ *Conexión en paralelo*: uniendo todos los lados de tipo P, por un lado, y los de tipo N por otro. La tensión es la correspondiente a una celda, pero la

⁸ MUJAL ROSAS, Ramón M. Tecnología eléctrica. Edicions UPC. Barcelona. 2000.

corriente aumenta, ya que es la suma de todas las intensidades generadas por cada celda.

- ✦ *Conexión mixta*: es la conexión combinada en serie y paralelo de las celdas. Las propiedades de la tensión y corriente, en este caso, dependerán del conexionado final. Normalmente la tensión generada será la suma de las tensiones de las celdas en serie, siendo la corriente la suma de todas las celdas colocadas en paralelo.

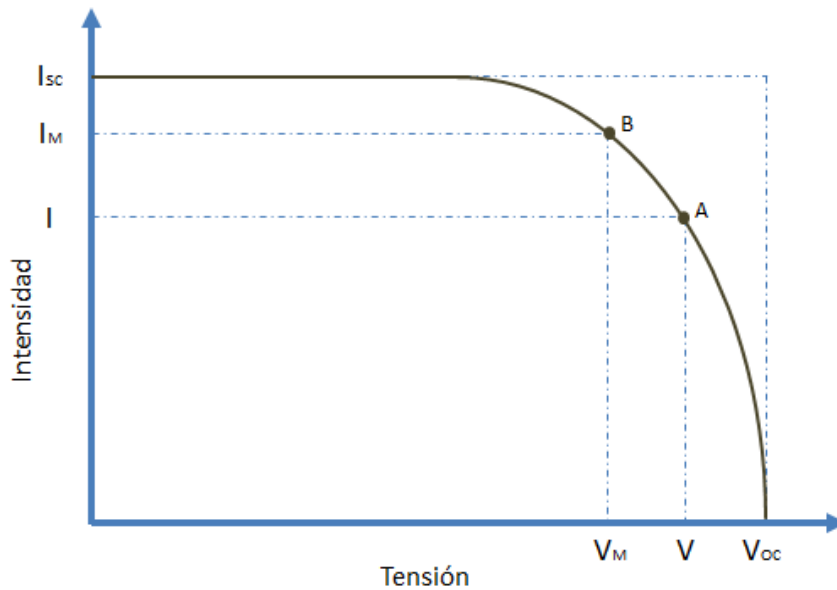
4.2 CURVA I-V

La curva característica de un panel fotovoltaico, también llamada curva de intensidad-tensión (abreviadamente curva I-V), representa los valores de tensión y corriente, medidos experimentalmente, de un panel fotovoltaico típico sometido a unas determinadas condiciones constantes de insolación y temperatura.

Variando la resistencia externa desde el valor máximo hasta cero, se pueden medir diversos valores de pares (I-V), que interpolándolos forman la curva característica (ver Figura 2).

El punto A es un punto cualquiera que representa el funcionamiento del panel en unas condiciones de Intensidad y Tensión determinadas por la resistencia o "carga" exterior. El panel desarrolla cierta potencia I-V, que geoméricamente coincide con el área del rectángulo cuyo vértice superior derecho es el punto A. Si el punto A se "moviera" hacia la derecha, bajando por la curva, se ve que el área de dicho rectángulo cambia, al decrecer la corriente muy rápidamente. Por el contrario, si dicho punto se trasladase hacia la izquierda, aproximándose al eje de coordenadas, el voltaje decrece.

Figura 2. Curva I-V



Fuente: FERNANDEZ BARRERA, Manuel. Energía Solar: Electricidad Fotovoltaica.

Existe un cierto punto intermedio B donde el área del rectángulo es la mayor posible. Dicho punto B es el punto de máxima potencia. El factor de forma (FF) es el cociente del área del rectángulo definido por el punto B y el rectángulo exterior a la curva, cuyos lados son I_{sc} y V_{oc} ⁹.

Para un determinado modelo de panel y en unas condiciones de intensidad luminosa y temperatura constante, la curva I-V queda determinada y el punto concreto sobre dicha curva que representa las condiciones de trabajo del panel quedará fijado para el circuito que alimenta éste.

4.3 INCLINACIÓN, ORIENTACIÓN Y SOMBRAS

Frente a la opción de emplear un sistema de seguimiento, una solución estática puede resultar suficiente para determinadas aplicaciones.

⁹ FERNANDEZ BARRERA, Manuel. Energía Solar: Electricidad Fotovoltaica. Madrid. Liberfactory. 2010.

Naturalmente, en este caso la energía colectada no es la máxima posible pero puede resultar aceptable si se da al panel fotovoltaico una determinada orientación, la cual se puede variar con ajustes estacionales para conseguir algunas mejoras.

Inclinación

La radiación solar que incide sobre una placa variará con el ángulo que forme la misma con la radiación. La captación de energía solar será máxima cuando la posición de la placa solar sea perpendicular a la radiación.

La inclinación de los rayos del sol respecto a la superficie horizontal es variable a lo largo del año (máxima en verano y mínima en invierno) y por tanto, en aquellas instalaciones cuyos paneles estén fijos, existirá un ángulo de inclinación que optimizará la colección de energía sobre una base anual. Es decir, conviene buscar el ángulo de inclinación de los paneles respecto al plano horizontal que hace máxima la potencia media anual recibida.

Las pérdidas de las superficies horizontales con respecto a las que están inclinadas aumentan progresivamente a medida que nos acercamos al norte (en el hemisferio norte) o al sur (en el hemisferio sur). En los polos, los planos horizontales son inútiles. No obstante, es difícil valorar las pérdidas en los climas templados ya que la proporción de luz difusa del sol es más grande debido a la presencia de polvo, vapor de agua y nubes. La orientación no ofrece ninguna ventaja en cuanto a la energía recibida desde la radiación indirecta. Por el contrario, debido a que los paneles inclinados reciben la luz de una parte del hemisferio, estos recogen menos luz difusa que los receptores horizontales¹⁰.

¹⁰ AGUILERA NIEVES. Antonio. Montaje mecánico en instalaciones solares fotovoltaicas. 1ª edición. Málaga-España. Editorial Vértice. 2011.

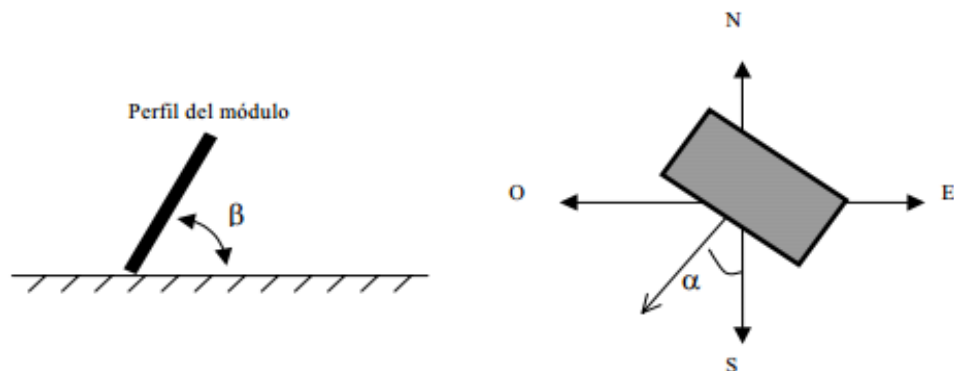
Orientación

Las desviaciones hacia el oeste o hacia el este en un ángulo inferior a 30° hacen disminuir la radiación diaria recibida en un pequeño valor que se cifra en menos del 5%. Por el contrario, para ángulos superiores a este valor, las pérdidas en la irradiación captada son considerables¹¹.

Las pérdidas por este concepto se calcularán en función de:

- ✧ *Ángulo de inclinación*, β , definido como el ángulo que forma la superficie de los módulos con el plano horizontal. Su valor es 0° para módulos horizontales (coplanarios) y 90° para verticales.
- ✧ *Ángulo de acimut*, α , definido como el ángulo que forma un cuerpo celeste y el norte geográfico, medido en sentido de rotación de las agujas de un reloj alrededor del horizonte del observador.

Figura 3. Inclinación y orientación de los módulos



Fuente: CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN. Documento Básico HE Ahorro de energía.

Sombras

Es de gran importancia evitar áreas sombreadas sobre un panel fotovoltaico en la medida posible, ya que esto puede disminuir en gran proporción la

¹¹ Ibid., p. 28.

producción de electricidad. Además, una pequeña sombra puede provocar puntos calientes en el panel y formar manchas, que disminuyen su vida útil. Por eso se debe poner especial atención al proyectar las instalaciones solares y definir correctamente la ubicación¹².

El efecto negativo de las sombras producidas por el polvo, los excrementos de los pájaros u hojas caídas de los árboles, está en dependencia de las particularidades del entorno y de la autolimpieza de la instalación, así como de la limpieza sistemática y el mantenimiento de los paneles.

La sombra causada por los obstáculos colindantes sobre las celdas solares, puede determinarse por medio del conocimiento de la trayectoria solar. Para la determinación de las sombras se utilizan dos métodos:

Método de la altitud solar: observar desde un punto los objetos colindantes y determinar las posibles sombras que darían dichos objetos sobre el punto.

Método de la sombra sobre la superficie horizontal: observar desde el objeto colindante el área de sombra que éste produce.

La orientación e inclinación del panel fotovoltaico y las posibles sombras sobre el mismo serán tales que las pérdidas sean inferiores a los límites de la Tabla 1¹³. En ella se consideran tres (3) casos: general, superposición de módulos e integración arquitectónica. Se considera que existe integración arquitectónica cuando los módulos cumplen una doble función energética y arquitectónica y además sustituyen elementos constructivos convencionales o son elementos constituyentes de la composición arquitectónica.

¹² LYNN. Op. cit., p. 21.

¹³ CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN. Documento Básico HE Ahorro de energía. España. 2009.

Tabla 1. Pérdidas límite

Caso	Orientación e inclinación	Sombras	Total
General	10%	10%	15%
Superposición	20%	15%	30%
Integración arquitectónica	40%	20%	50%

Fuente: CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN. Documento Básico HE Ahorro de energía.

Se considera que existe superposición arquitectónica cuando la colocación de los paneles se realiza paralela a la envolvente del edificio, no aceptándose en este concepto la disposición horizontal con el fin de favorecer la autolimpieza de los módulos. Una regla fundamental a seguir para conseguir la integración o superposición de las instalaciones solares es la de mantener, dentro de lo posible, la alineación con los ejes principales de la edificación.

5. DISEÑO EXPERIMENTAL

A partir del primer período académico del año 2014 se llevó a cabo la aprobación del título de este proyecto de grado, a su vez se creó el plan de desarrollo que se esperaba ejecutar a inicios del segundo período académico del mismo año. Con el propósito de avanzar con el cumplimiento de los objetivos propuestos se inició con el diseño de la estructura que soportaría los paneles fotovoltaicos permitiendo variar su inclinación y orientación. Producto de esta etapa se obtuvo una maqueta con relación de 1:10 y especificaciones detalladas. (Ver Figura 4).

Dicho modelo estructural consta de una torre o columna formada por cuatro costados tipo cercha, cada uno de 1.8 metros de largo, ensamblados con tubos metálicos cuadrados, la cual se soporta en una platina metálica con perforaciones en sus extremos o ángulos para su fijación. En la base de la torre va un soporte o refuerzo tipo pie amigo en cada costado para mayor estabilidad, con medidas de largo: 1.20 metros, alto extremo superior: 40 cm y alto extremo inferior: 20 cm.

Figura 4. Modelo estructural



En la parte superior de la torre se ubicó una platina que sirve como soporte para el mecanismo de direccionamiento de los paneles. Esta platina cuenta con una perforación en el centro que da cabida al cilindro que hace parte del rotor que permite el movimiento giratorio. Dentro del cilindro se introdujo un tubo o cilindro de menor diámetro, lo más ajustado posible, para tener así el rotor con una parte fija a la estructura de la torre y una parte giratoria interna que se soldó a la platina de sujeción. En la parte de abajo se soldó una platina dentada o piñón que actúa como freno, ya que cuenta con un pin adherido a una palanca tirada por resortes, con el fin de que el pin entre en la cavidad del piñón y haga las veces de freno. Así se tiene el mecanismo de direccionamiento.

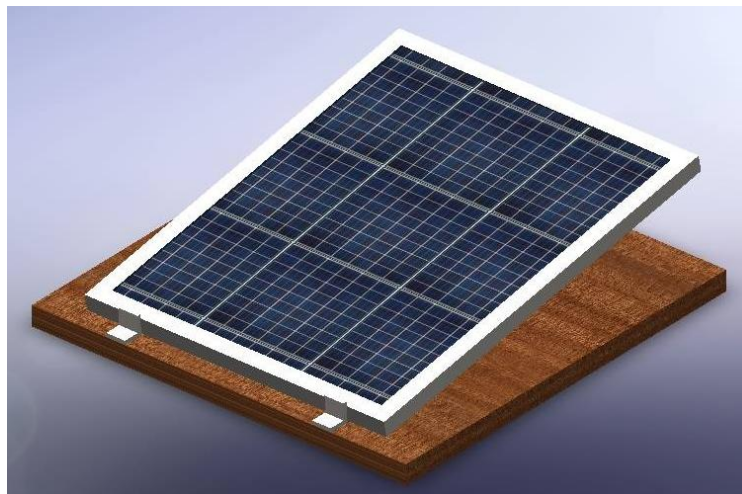
En la parte superior de la torre se encuentra una platina base, que permite un movimiento giratorio de 360 grados. Luego se tienen 2 soportes verticales en forma de pirámide que se posicionan en los dos costados de dicha platina y en paralelo. En la parte superior de los mismos va un tubo en forma horizontal de lado a lado uniendo los extremos de los soportes. Dicho tubo cuenta con un movimiento giratorio, ya que allí se fijan los elementos en forma de pirámides invertidas que son parte de la estructura del soporte de los paneles solares.

En uno de los extremos del soporte o eje giratorio de la parte superior, hay un mecanismo que consta de una media luna dentada, en cuyos orificios entre dientes, entra un pin impulsado o halado por resortes, el cual está adherido a una palanca que actúa como posicionador de la inclinación del sistema de soporte de los paneles solares, que son fijados al extremo de este con tornillos.

Llegados a este punto y finalizando el segundo periodo académico, se obtuvo la recomendación de la Directora y Codirectores del proyecto de grado de empezar a trabajar en la Sede Central de la UIS con un panel fotovoltaico adquirido por el grupo GISEL, esto en consecuencia a la larga espera por aprobación para la instalación de los paneles fotovoltaicos en el Parque Tecnológico Guatiguará.

Se trabajó con el panel fotovoltaico de referencia SP50M (ver Anexo A) al cual se le implementó una base en madera rígida con un par de sujetadores con el propósito de tener mayor estabilidad y seguridad al momento de estar a la intemperie. Para variar la inclinación se diseñaron unos soportes en balsa, que se ubicaban entre la base de madera y la parte posterior del panel (ver Figura 5).

Figura 5. Estructura implementada



Para situar el panel fotovoltaico dentro del campus universitario y comenzar a tomar medidas, se hizo una inspección para determinar el lugar más apropiado teniendo en cuenta la superficie, acceso a fuentes de energía y posibles sombras sobre el panel durante el día. Arrojando como resultado la zona ubicada en la parte posterior del edificio de Ingenierías Físico-Mecánicas. Con coordenadas geográficas N 7° 08' 26.98" O 73° 07' 22.82".

A partir del 24 de febrero del 2015 se inició el estudio que se llevó a cabo durante dos (2) meses. Para el ángulo de inclinación (β) se escogieron: 0°, 4°, 7°, 10°, 15°, 30° y 60° teniendo en cuenta la región donde se instalarían los paneles. El ángulo de acimut (α) se varió cada 45° en sentido horario con relación al norte geográfico.

En cada día de estudio se recopilaron datos de tensión y corriente de 8:00 AM a 5:00 PM para obtener la curva I-V, tomando el valor de tensión en circuito abierto (cuando la carga era infinita), luego se disminuía la resistencia de la carga y se tomaba la lectura de corriente y tensión para cada valor de esta, finalizando con el valor de la corriente en corto circuito (cuando la carga era igual a cero). Los instrumentos utilizados fueron: un multímetro Quality Electronics 66B2660, un amperímetro Mastech 7030 y un reóstato Cenco de 44 ohmios. Facilitados por el almacén de la E3T, ubicado en el edificio de Ingenierías Físico-Mecánicas.

Inicialmente se optó por mantener una inclinación determinada para la mitad de la jornada de estudio, variando la orientación cada 40 minutos a la vez que se tomaban muestras en un rango de cada 10 minutos. Después para el resto del día se cambiaba el grado de inclinación establecido y se seguía variando las orientaciones en la secuencia que se traía de la etapa anterior. De esta manera se trabajó durante seis (6) días hasta terminar todas las posibles combinaciones. Para verificar los datos obtenidos, se trabajó de manera invertida a la etapa anterior, es decir, se fijó una orientación y se rotaron las inclinaciones bajo las mismas condiciones previas.

Como alternativa a la adquisición de datos se determinó una inclinación específica para cada día de estudio, entretanto se variaban por hora las orientaciones cada cinco minutos y se tomaban los datos respectivos para la obtención de la curva I-V. Los valores de irradiancia y temperatura se descargaron en tiempo real a través de la Estación Meteorológica de la UIS, por medio del portal de Ingeniería Civil.

En cuanto al estudio de pérdidas por sombras, después de varios imprevistos presentados, se pudo iniciar en los primeros días del mes de Julio, trabajando en la instalación fotovoltaica realizada en la terraza del edificio de investigación del Parque Tecnológico Guatiguará (ver Figura 6), con conexión directa al laboratorio de Integración Energética que pertenece al grupo GISEL, ubicado

en el salón 308. Para esta instalación se hizo el acompañamiento en conjunto con el contratista EDECS S.A.S., la perspectiva estructural de dicha instalación se observa en el Anexo B.

Figura 6. Instalación de paneles fotovoltaicos en el Parque Tecnológico Guatiguará



Inicialmente se obtuvieron curvas características (I-V) para la referencia de panel fotovoltaico con el que se contó (ver Anexo C). Estas pruebas se llevaron a cabo sin sombra y posteriormente se agregaron diferentes tipos de sombreado, tanto para un panel de manera individual, al igual que con dos de ellos conectados en serie. Buscando un punto de referencia, se estableció trabajar bajo condiciones de irradiancia cercanas a los $1000[W/m^2]$ para todas las pruebas, teniendo en cuenta que es una de las características estándar de medida por parte de los fabricantes. Los instrumentos que se utilizaron para las mediciones fueron: un multímetro UNI-T UT58-A, un amperímetro BK Precision 325 y dos reóstatos para arranque de motor, tipo PB de 8 ohmios cada uno. Facilitados por el almacén de la E3T, localizado en el edificio de Ingenierías Físico-Mecánicas.

6. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Recopilando toda la información obtenida durante estos dos (2) meses de estudio, se visualizó el comportamiento del panel fotovoltaico con su curva I-V en cada día de trabajo considerando los valores de irradiancia y temperatura. Seccionando por hora los resultados correspondientes, se planteó una clasificación conforme a la máxima potencia obtenida para cada día, en intervalos de irradiancia de 50[W/m²]. (Ver Anexo D).

En el análisis para cada hora de estudio se encuentran dos tablas. En la primera se visualiza una síntesis de datos que se obtuvieron, donde los tres (3) primeros son los más significativos en cuanto a potencia máxima, el resto son puntos de relevancia que permiten hacer comparaciones. En la siguiente tabla se percibe un indicador verde (↑) o rojo (↓) que hacen referencia al aumento o descenso respectivamente que posee cada caso en particular para cada variable en específico de acuerdo a las comparaciones realizadas entre ellos. Asimismo se estima el porcentaje de pérdida en eficiencia.

Finalmente se avista una figura con las curvas características I-V y P-V, reflejando la mejor opción para cada hora como resultado del análisis.

- **Análisis de 8-9 AM**

En la Tabla 2 se contemplan los datos más relevantes recopilados al examinar el comportamiento del panel fotovoltaico influenciado bajo ciertas condiciones de operación. Los más significativos fueron los tres (3) primeros, esto en cuanto a máxima potencia generada, el resto son casos destacados que hacen parte del análisis y permiten efectuar comparaciones con el fin de obtener la mejor opción posible. En cada uno de ellos se especifica su grado de inclinación y orientación, al igual que su valor de irradiancia, temperatura y potencia conseguida. De manera semejante a lo anteriormente expuesto, se aborda el inicio para cada hora de análisis siguiente.

Tabla 2. Síntesis de valores obtenidos de 8-9 AM

	Potencia Máxima [W]	Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura °C
Caso 1	48,43	60°	270° Oeste	482	22,7
Caso 2	36,11	7°	315° Noroeste	371	25,4
Caso 3	34,92	10°	315° Noroeste	264	24,2
Caso 4	1,869	60°	45° Noreste	615	26,7
Caso 5	16,492	7°	315° Noroeste	178	20,6
Caso 6	31,85	7°	270° Oeste	563	23,6
Caso 7	27,9	10°	180° Sur	547	28,7
Caso 8	33,024	10°	0° Norte	91	20,1

Al comparar los primeros 3 casos de la Tabla 2 el primero presenta el valor máximo de potencia generada, y tomando este como referencia las pérdidas en cuanto a eficiencia son de 25,4% para el caso 2 y 27,9% para el caso 3.

Es importante manifestar que este primer suceso se da de manera muy concreta, por tanto no permite generalizar, debido a que existe un aumento en irradiancias de 111[W/m²] y 218[W/m²] en el segundo y tercer caso respectivamente. (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Comparación de 8-9 AM

		Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura [°C]	Pérdida en Eficiencia
Caso 1	Caso 2	53° ↓	45° ↑	111 ↓	2,7 ↑	25,4%
	Caso 3	50° ↓	45° ↑	218 ↓	1,5 ↑	27,9%
	Caso 4	=	225 ↓	133 ↑	4 ↑	96,1%
Caso 2	Caso 5	=	=	193 ↓	4,8 ↓	54,3%
	Caso 6	=	45 ↓	192 ↑	1,8 ↓	11,8%
Caso 3	Caso 7	=	135 ↓	283 ↑	4,5 ↑	20,1%
	Caso 8	=	315 ↓	173 ↓	4,1 ↓	5,4%

La variación en el ángulo de orientación entre estos tres (3) primeros casos no es muy notoria, pero permite ir visualizando el rango más adecuado de trabajo para esta hora del día.

Un ejemplo de la importancia en la fijación del ángulo de orientación de los paneles fotovoltaicos se contempla al comparar el caso 1 (ver Tabla 2) con uno de los datos arrojados como mayor potencia generada para esta hora, el caso 4, en el cual se tiene el mismo ángulo de inclinación de 60° pero una orientación de 45° Noreste. Se evidencia que a pesar de tener $133[\text{W}/\text{m}^2]$ más respecto al caso 1, presenta pérdidas en eficiencia de 96,1%.

Para el caso 2 de la Tabla 3 se tienen dos puntos de comparación. Uno de ellos es el caso 5 donde la inclinación y orientación es igual, la irradiancia y temperatura presentan una disminución moderada en relación al caso 2, permitiendo verificar la influencia de estas variables que elevan las pérdidas a más del cincuenta por ciento. En consecuencia, para el otro punto de comparación que sería el caso 6, se presenta una pequeña variación en el ángulo de orientación respecto al del caso 2, al igual que un aumento medido en el índice de irradiancia logrando de esta manera pérdidas de 11,8%. De igual forma en la Tabla 3 se tienen los resultados expuestos para el caso 3.

Con los resultados arrojados en la Tabla 3, se puede evidenciar que no es viable una inclinación de 60° debido al gran porcentaje de pérdida presentado con pequeñas variaciones en la orientación, sin importar el aumento en el índice de irradiancia y temperatura.

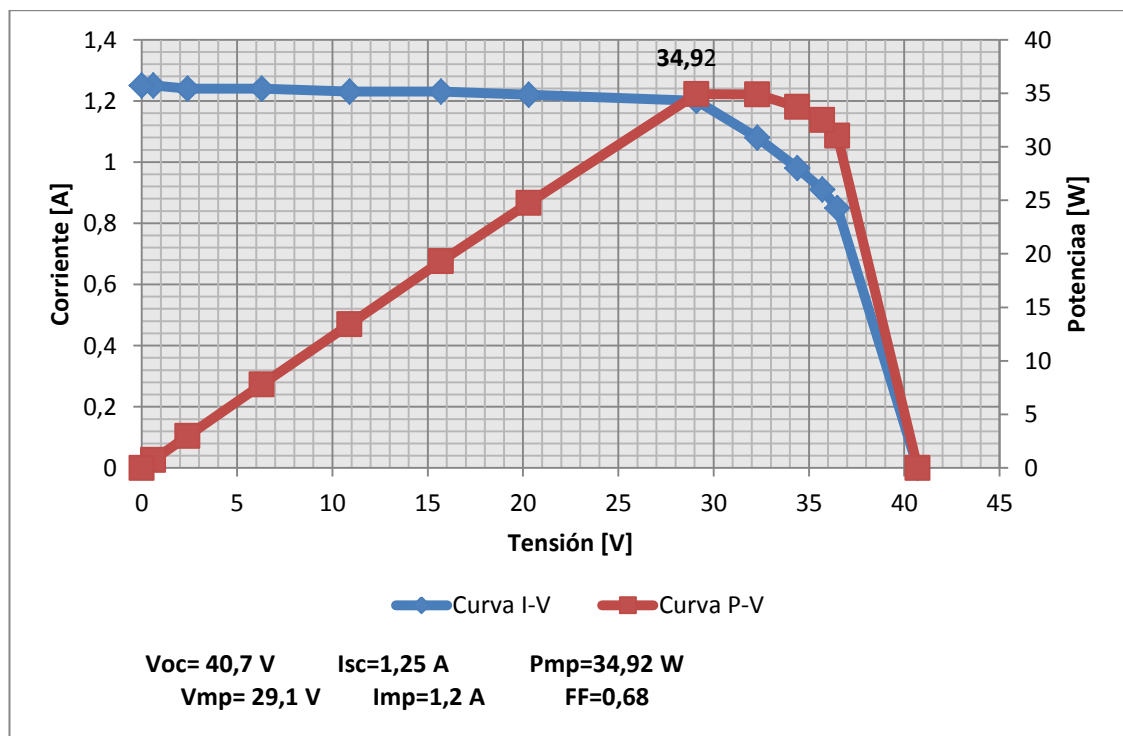
En cuanto al ángulo de inclinación de 7° las pérdidas son menores, aunque se afecta en gran medida por la disminución en el índice de irradiancia, aun contando con la misma inclinación y orientación. Al momento de variar un poco la orientación y aumentar el índice de irradiancia se obtiene mejor rendimiento como se aprecia en el caso 6 de la Tabla 3.

No obstante, para la inclinación de 10° se tienen mejores porcentajes de eficiencia incluso para una orientación casi opuesta (caso 7, Tabla 3) o cercana, al igual que cuando se presenta un aumento o disminución en el índice de irradiancia y temperatura.

De esta manera se puede evidenciar la forma en la que influye la variación de la orientación y/o irradiancia para un panel fotovoltaico con inclinaciones de 60° , 7° y 10° al momento de alcanzar su máxima potencia de trabajo.

Sobre la base anterior, se determina como variable de mayor eficiencia la inclinación de 10° , en un rango de orientación entre $270^\circ - 315^\circ$ en relación a los resultados de máxima potencia obtenida.

Figura 7. Curvas características para $\beta=10^\circ$ y $\alpha=315^\circ$



En la Figura 7 se presentan las curvas características I-V y P-V para el caso 3 de la Tabla 2. Donde se observa una tensión de circuito abierto de 40,7[V], corriente de corto circuito de 1,25[A], máxima potencia de 34,92[W], tensión en

el punto de máxima potencia de 29,1[V], corriente en el punto de máxima potencia de 1,2[A] y factor forma 0,68.

- **Análisis de 9-10 AM**

Tabla 4. Síntesis de valores obtenidos de 9-10 AM

	Potencia Máxima [W]	Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura °C
Caso 1	52,19	30°	270° Oeste	237	23,3
Caso 2	44,7	60°	270° Oeste	538	25
Caso 3	43,935	10°	270° Oeste	865	29,1
Caso 4	5,11	30°	315° Noroeste	107	21,8
Caso 5	2,046	30°	0° Norte	178	23,2
Caso 6	2,496	60°	135° Sureste	805	28,1
Caso 7	41,396	10°	270° Oeste	148	20,4
Caso 8	37,468	10°	315° Noroeste	364	24,3
Caso 9	33,936	10°	135° Sureste	807	28,9
Caso 10	14,326	7°	45° Noreste	153	20,4
Caso 11	38,735	7°	45° Noreste	784	27,4
Caso 12	41,561	7°	315° Noroeste	540	27,7
Caso 13	42,704	7°	315° Noroeste	839	24,3

Con referencia al caso 1 de la Tabla 4 se presenta el valor de potencia máxima generada y haciendo alusión a este, se genera un promedio en pérdidas de eficiencia del quince por ciento, para el caso 2 y 3 (ver Tabla 5). Asimismo, en el caso 4 y 5 resultan pérdidas de más del noventa por ciento con pequeñas variaciones en el índice de irradiancia y ángulo de orientación. De igual manera, en la Tabla 5 se presentan los resultados arrojados para los demás casos.

Tabla 5. Comparación de 9-10 AM

		Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura [°C]	Pérdida en Eficiencia
Caso 1	Caso 2	30° ↑	=	301 ↑	1,7 ↑	14,4%
	Caso 3	20° ↓	=	628 ↑	5,8 ↑	15,8%
	Caso 4	=	45° ↑	130 ↓	1,5 ↓	90,2%
	Caso 5	=	270° ↓	59 ↓	0,1 ↓	96,1%
	Caso 2	Caso 6	=	135° ↓	267 ↑	3,1 ↑
Caso 3	Caso 7	=	=	717 ↓	8,7 ↓	5,7%
	Caso 8	=	45° ↑	501 ↓	4,8 ↓	14,7%
	Caso 9	=	135° ↓	58 ↓	0,2 ↓	22,8%
	Caso 10	3° ↓	225° ↓	712 ↓	8,7 ↓	67,4%
	Caso 11	3° ↓	225° ↓	81 ↓	1,7 ↓	11,8%
	Caso 12	3° ↓	45° ↑	325 ↓	1,4 ↓	5,4%
	Caso 13	3° ↓	45° ↑	26 ↓	4,8 ↓	2,8%

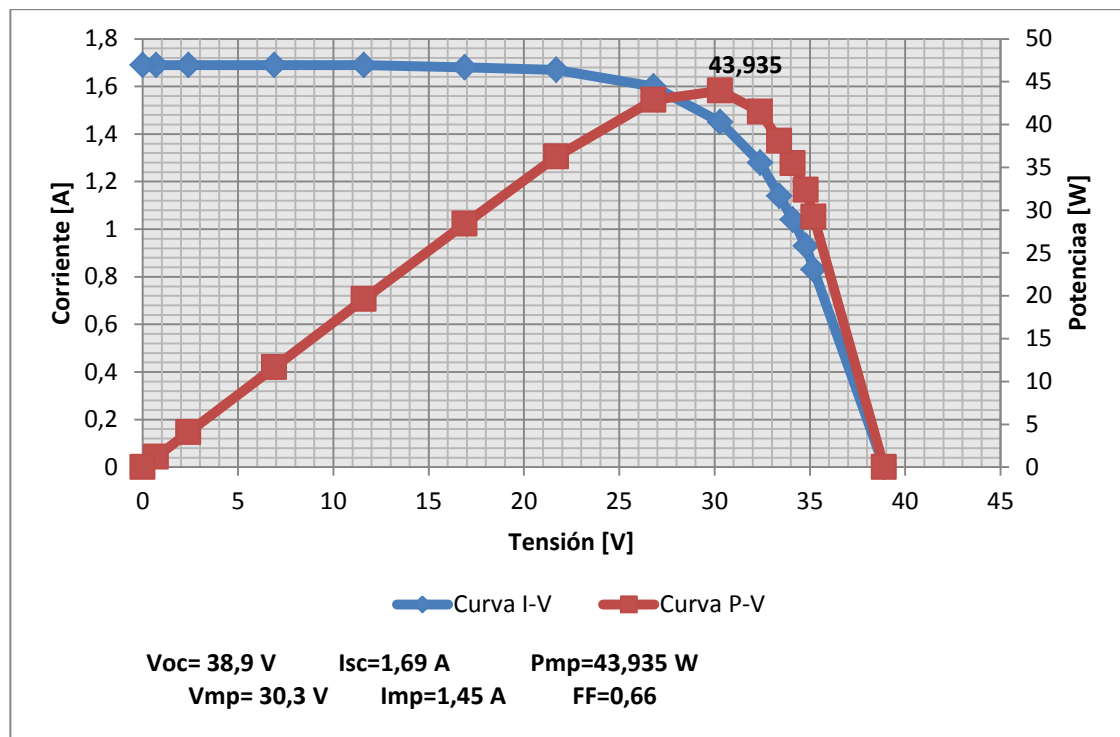
La Tabla 5 permite apreciar las pérdidas elevadas para un ángulo de inclinación de 30°, tanto para una variación no sustancial en orientación, al igual que con un movimiento más definido en ésta. Aconteciendo de manera similar al presentarse poca variación en el índice de irradiancia, que al final termina incidiendo en el alto porcentaje de pérdidas. En consecuencia, se tiene para el ángulo de inclinación de 60° un resultado semejante al anterior en cuanto a porcentaje de pérdidas dados, mostrando de nuevo porque este tipo de inclinaciones no resulta favorable incluso bajo condiciones de mayor irradiancia.

Al contrario, para el ángulo de inclinación de 10° se tienen los porcentajes de pérdidas más bajos en relación a la misma inclinación y orientación, incluso con una disminución bastante notoria en el índice de irradiancia y temperatura. Además se muestran valores de pérdidas más aceptables para variaciones en el ángulo de orientación.

Particularmente se encuentran datos significativos para un ángulo de inclinación de 7° , que al ser comparados con una inclinación de 10° presentan porcentajes de pérdidas reducidas, sobre todo para las situaciones en las que la orientación es cercana, inclusive con disminución del índice de irradiancia.

Después de lo expuesto se contempla como variable más adecuada la inclinación de 10° , en el rango de orientación entre $270^\circ - 315^\circ$ por su estabilidad en los resultados obtenidos de potencia elevada.

Figura 8. Curvas características para $\beta=10^\circ$ y $\alpha=270^\circ$



En la Figura 8 se aprecian las curvas características I-V y P-V para el caso 3 de la Tabla 4. Donde se presenta una tensión de circuito abierto de 38,9[V], corriente de corto circuito de 1,69[A], máxima potencia de 43,935[W], tensión en el punto de máxima potencia de 30,3[V], corriente en el punto de máxima potencia de 1,45[A] y factor forma 0,66.

- **Análisis de 10-11 AM**

Tabla 6. Síntesis de valores obtenidos de 10-11 AM

	Potencia Máxima [W]	Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m²]	Temperatura °C
Caso 1	57,036	10°	315° Noroeste	882	29,2
Caso 2	52,124	7°	270° Oeste	255	21,3
Caso 3	49,612	15°	270° Oeste	1039	29,7
Caso 4	45,816	10°	45° Noreste	958	29,1
Caso 5	39,468	10°	180° Sur	830	27,2
Caso 6	9,016	10°	315° Noroeste	100	20,7
Caso 7	45,084	7°	270° Oeste	910	26,6
Caso 8	44,982	7°	225° Suroeste	708	29,9
Caso 9	45,095	15°	270° Oeste	526	26,4
Caso 10	3,332	15°	315° Noroeste	227	23,2

Los primeros 3 casos de la Tabla 6 presentan los mayores valores de potencia generada, y al ser tomado el primer caso como referencia, se dan pérdidas por eficiencia de 8,6% para el caso 2 y 13% para el caso 3. Por otro lado, las pérdidas en el caso 4 marcan 19,7% con 76[W/m²] más y orientación opuesta, semejante al caso 5, con pérdidas de 30,8% y 52[W/m²] menos.

Finalmente el caso 6 arroja pérdidas de 84,2%, con 782[W/m²] menos e igual orientación a la del caso 1. De modo similar en la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos de las comparaciones de los otros casos.

En la Tabla 7 se tienen porcentajes de pérdidas más aceptables excepto cuando se presenta una gran disminución en el índice de irradiancia, como por ejemplo para una inclinación de 10° e igual orientación, como se presenta en el caso 6 respecto al caso 1. Las pérdidas son bastante elevadas, pero es importante tener en cuenta la gran disminución en el índice de irradiancia además de los grados de temperatura. Con estos 10° de inclinación se muestran mejores resultados para valores de irradiancia más cercanos, incluso con variación en la orientación de manera prácticamente opuesta.

Tabla 7. Comparación de 10-11 AM

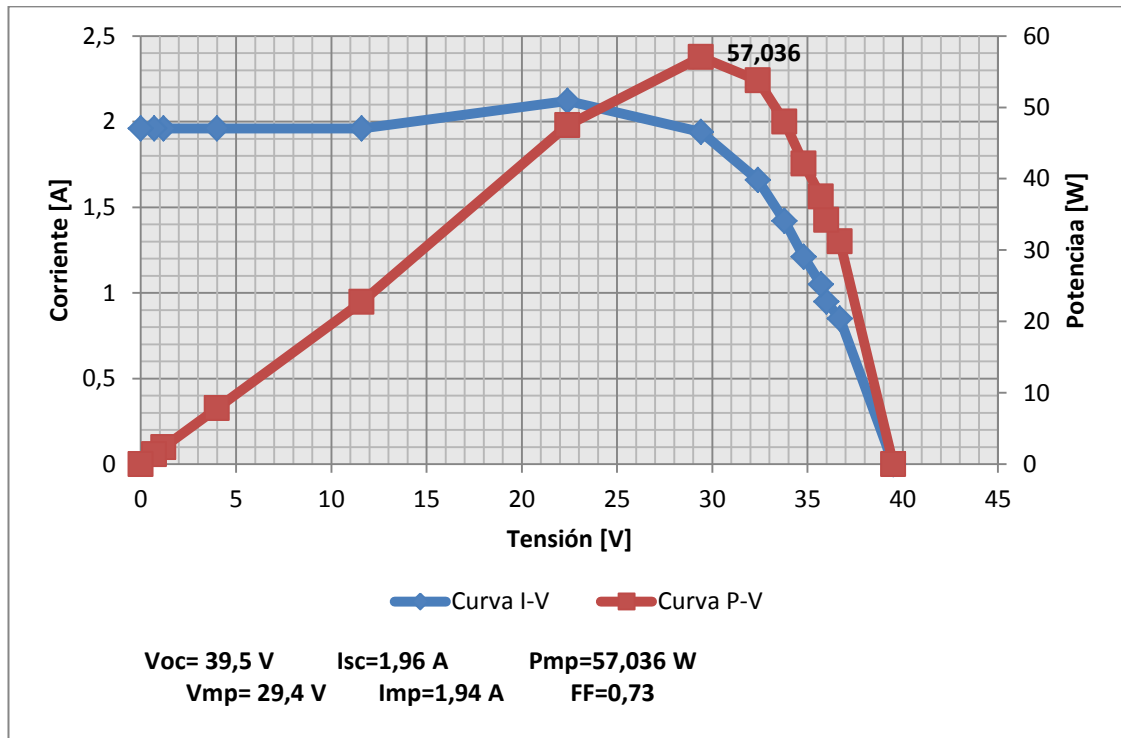
		Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura [°C]	Pérdida en Eficiencia
Caso 1	Caso 2	3° ↓	45° ↓	627 ↓	7,9 ↓	8,6%
	Caso 3	5° ↑	45° ↓	157 ↑	0,5 ↑	13%
	Caso 4	=	270° ↓	76 ↑	0,1 ↓	19,7%
	Caso 5	=	135° ↓	52 ↓	2 ↓	30,8%
	Caso 6	=	=	782 ↓	8,5 ↓	84,2%
Caso 2	Caso 7	=	=	655 ↑	5,3 ↑	13,5%
	Caso 8	=	45° ↓	453 ↑	8,3 ↑	13,7%
Caso 3	Caso 9	=	=	513 ↓	3,3 ↓	9,1%
	Caso 10	=	45° ↑	812 ↓	6,5 ↓	93,3%

En la comparación para el ángulo de inclinación de 7° se observan valores de pérdidas bajos, manteniendo o variando un poco la orientación, pero también se observa un elevando aumento en el valor de irradiancia junto con el de temperatura. A tal modo que ni de esta manera se consigan valores de potencia más cuantiosos que los vistos para la inclinación de 10°.

Con el ángulo de inclinación de 15° se da un caso contrario a lo expuesto anteriormente, esto en el sentido de que para una variación leve en la orientación, las pérdidas son de 93,3% aunque con una notoria disminución en el valor de irradiancia y temperatura. Para una misma orientación se presentan pérdidas menores de 9,1%, inclusive para un apreciado menor índice de irradiancia.

En el marco de las observaciones anteriores, se considera más adecuado el rango de inclinación entre 7° – 10°, y el rango de orientación entre 270° – 0°, a causa de la continuidad en los altos valores de potencia.

Figura 9. Curvas características para $\beta=10^\circ$ y $\alpha=315^\circ$



En la Figura 9 se examinan las curvas características I-V y P-V para el caso 1 de la Tabla 6. Donde se expone una tensión de circuito abierto de 39,5[V], corriente de corto circuito de 1,96[A], máxima potencia de 57,036[W], tensión en el punto de máxima potencia de 29,4[V], corriente en el punto de máxima potencia de 1,94[A] y factor forma 0,73.

- **Análisis de 11 AM -12 M**

Al equiparar los 3 primeros casos de la Tabla 8, el valor máximo de potencia se presenta para el primero y tomando a este como referencia se tienen pérdidas de 4,6% para el caso 2 y 8,8% para el caso 3. En relación a lo anterior, el caso 4 manifiesta pérdidas de 14,8% aun con 400[W/m²] más que en el caso 1 pero con un ángulo de orientación distante. Mientras que el caso 5 produce pérdidas de 92,2% con 1103[W/m²] menos y una orientación cercana. De igual forma en la Tabla 9 se tienen los resultados expuestos para el resto de casos.

Tabla 8. Síntesis de valores obtenidos de 11 AM -12 M

	Potencia Máxima [W]	Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura °C
Caso 1	59,409	4°	315° Noroeste	1224	27,2
Caso 2	56,7	15°	270° Oeste	452	28,4
Caso 3	54,162	0°	0° Norte	592	27,3
Caso 4	50,634	4°	90° Este	824	30,2
Caso 5	4,653	4°	270° Oeste	121	21,6
Caso 6	48,411	15°	45° Noreste	984	29
Caso 7	16,947	15°	315° Noroeste	290	23,9
Caso 8	52,353	10°	270° Oeste	406	27,8
Caso 9	50,74	0°	45° Noreste	1002	29,8
aso 10	14,868	0°	45° Noreste	213	21,3

En primer lugar la Tabla 9 revela las pérdidas para un ángulo de inclinación de 4°, donde se percibe que para una orientación particularmente opuesta y con un reducido valor en el índice de irradiancia se dan resultados favorables. Al contrario para cuando se presenta una orientación un poco distante, pero una considerable reducción en los valores de irradiancia y temperatura, alcanzando pérdidas de 92,2%.

Tabla 9. Comparación de 11 AM -12 M

		Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura [°C]	Pérdida en Eficiencia
Caso 1	Caso 2	11° ↑	45° ↓	772 ↓	1,2 ↑	4,6%
	Caso 3	4° ↓	315° ↓	632 ↓	0,1 ↑	8,8%
	Caso 4	=	225° ↓	400 ↓	3 ↑	14,8%
	Caso 5	=	45° ↓	1103 ↓	5,6 ↓	92,2%
Caso 2	Caso 6	=	225° ↓	532 ↑	0,6 ↑	14,6%
	Caso 7	=	45° ↑	162 ↓	4,5 ↓	70,1%
	Caso 8	5° ↓	=	46 ↓	0,6 ↓	7,6%
Caso 3	Caso 9	=	45° ↑	410 ↑	2,5 ↑	6,3%
	Caso 10	=	45° ↑	379 ↓	6 ↓	72,6%

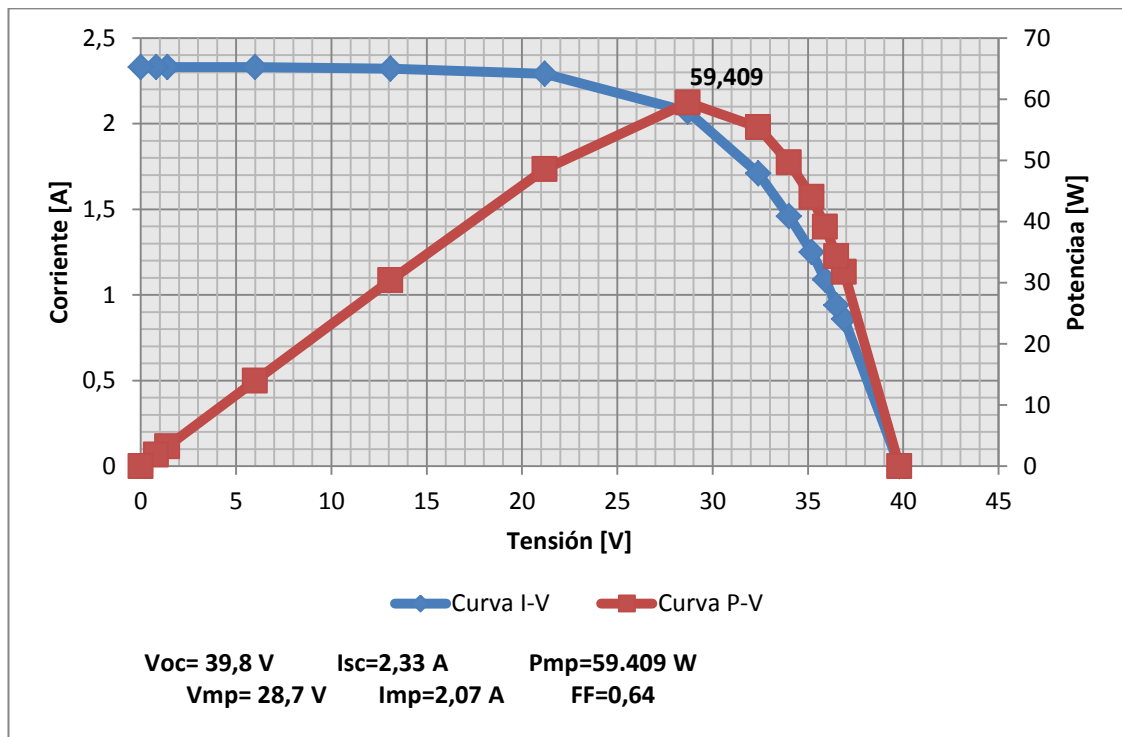
Por otra parte el ángulo de inclinación de 15° manifiesta un porcentaje de pérdida menor cuando su orientación varía notablemente, al igual que cuando se tiene un aumento significativo en el índice de irradiancia. En cambio para una variación mucho menor en orientación e irradiancia, las pérdidas aumentan considerablemente. A todo esto se presentan las pérdidas más bajas al compararse con el caso 8, donde el ángulo de inclinación es de 10° y su orientación equivalente, además se presenta un pequeño cambio en el valor de irradiancia.

En consecuencia para el ángulo de inclinación de 0° existe un contraste bastante particular en cuanto a porcentaje de pérdida, teniendo en cuenta que en ambos casos comparativos la orientación varía de la misma manera, pero muy poco. Asimismo cuando la irradiancia aumenta, claramente las pérdidas se reducen, al contrario para el efecto producido por una reducción sustancial en temperatura e irradiancia.

Dadas las condiciones que anteceden, se considera más factible el rango de inclinación entre $4^\circ - 10^\circ$, y el rango de orientación entre $270^\circ - 0^\circ$, debido a los resultados adquiridos con mayor eficiencia.

En la Figura 10 se presentan las curvas características I-V y P-V para el caso 1 de la Tabla 8. Donde se reconoce una tensión de circuito abierto de $39,8[V]$, corriente de corto circuito de $2,33[A]$, máxima potencia de $59,409[W]$, tensión en el punto de máxima potencia de $28,7[V]$, corriente en el punto de máxima potencia de $2,07[A]$ y factor forma $0,64$.

Figura 10. Curvas características para $\beta=4^\circ$ y $\alpha=315^\circ$



- **Análisis de 12-1 PM**

Tabla 10. Síntesis de valores obtenidos de 12-1 PM

	Potencia Máxima [W]	Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura °C
Caso 1	58,206	10°	315° Noroeste	1078	27,6
Caso 2	57,096	4°	90° Este	499	28,2
Caso 3	56,842	7°	180° Sur	411	24,4
Caso 4	48,36	10°	135° Sureste	972	28,4
Caso 5	24,15	10°	315° Noroeste	522	25
Caso 6	2,834	10°	135° Sureste	373	21,8
Caso 7	55,432	4°	180° Sur	510	27
Caso 8	42,84	4°	0° Norte	434	26,7
Caso 9	1,173	4°	0° Norte	53	21,2
Caso 10	55,062	7°	0° Norte	1018	32,9
Caso 11	53,152	7°	315° Noroeste	1056	28,9
Caso 12	45,6	7°	225° Suroeste	1016	30,2

Al comparar los 3 primeros casos de la Tabla 10 se presenta para el primero el valor máximo de potencia generada y haciendo referencia a este, las pérdidas en cuanto a eficiencia son de 1,9% para el caso 2 y de 2,3% para el caso 3. Además, relacionando los casos 4, 5 y 6 respecto al caso 1, las pérdidas son de 16,9%, 58,5%, 95,1% respectivamente. De igual manera, en la Tabla 11 se presentan los resultados arrojados para los demás casos.

Tabla 11. Comparación de 12-1 PM

		Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura [°C]	Pérdida en Eficiencia
Caso 1	Caso 2	6° ↓	225° ↓	579 ↓	0,6 ↑	1,9%
	Caso 3	3° ↓	135° ↓	667 ↓	3,2 ↓	2,3%
	Caso 4	=	180° ↓	106 ↓	0,8 ↑	16,9%
	Caso 5	=	=	556 ↓	2,6 ↓	58,5%
	Caso 6	=	180° ↓	705 ↓	5,8 ↓	95,1%
Caso 2	Caso 7	=	90° ↑	11 ↑	1,2 ↓	2,9%
	Caso 8	=	90° ↓	65 ↓	1,5 ↓	25%
	Caso 9	=	90° ↓	446 ↓	7 ↓	97,9%
Caso 3	Caso 10	=	180° ↓	607 ↑	8,5 ↑	3,1%
	Caso 11	=	135° ↑	645 ↑	4,5 ↑	6,5%
	Caso 12	=	45° ↑	605 ↑	5,8 ↑	19,8%

Inicialmente en la Tabla 11 se encuentran plasmados los resultados de la comparación realizada en base a al ángulo de inclinación de 10°, que presenta un porcentaje de pérdidas bajo, contando con una orientación opuesta y cierta disminución en el índice irradiancia. Para el caso en el que tanto la inclinación como la orientación son idénticas se elevan sus pérdidas a más del cincuenta por ciento, debido a su reducción por casi a la mitad del índice de irradiancia. Por consiguiente cuando se manifiesta la ocasión en la que la orientación es opuesta y se tiene una bastante reducción en el valor de irradiancia, incluso en el de temperatura, se advierte el mayor porcentaje de pérdidas en potencia.

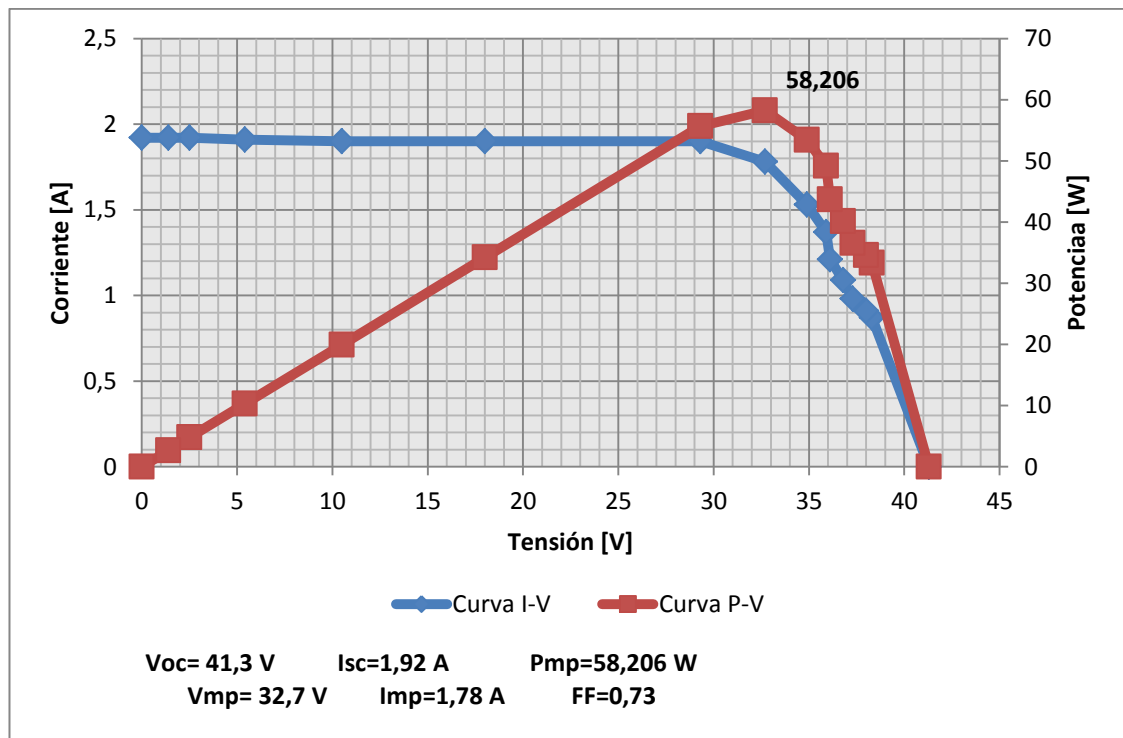
En ese mismo sentido considerando el ángulo de inclinación de 4°, la pérdida menos significativa aparece cuando se aumenta levemente la orientación y el

índice de irradiancia. Situación contraria se observa cuando la orientación e irradiancia disminuyen levemente, arrojando una pérdida mayor. Así como cuando existe una reducción significativa en el valor de irradiancia y temperatura.

Cabe agregar que los valores más reducidos en porcentaje de pérdidas de las comparaciones en la Tabla 11, se ven reflejados para un ángulo de inclinación de 7°. Iniciando con una orientación contraria, elevación sustancial de la temperatura y más del doble de irradiancia. Además no se percibe un cambio abrupto aun cuando se varía la orientación y se mantienen índices elevados de irradiancia y temperatura.

En efecto se estima más factible el rango de inclinación entre 4° - 10°, y el rango de orientación entre 315° - 45°, ya que los datos examinados ofrecen los mejores resultados en esos intervalos.

Figura 11. Curvas características para $\beta=10^\circ$ y $\alpha=315^\circ$



Se nota en la Figura 11 las curvas características I-V y P-V para el caso 1 de la Tabla 10. Donde se ilustra una tensión de circuito abierto de 41,3[V], corriente de corto circuito de 1,92[A], máxima potencia de 58,206[W], tensión en el punto de máxima potencia de 32,7[V], corriente en el punto de máxima potencia de 1,78[A] y factor forma 0,73.

- **Análisis de 1-2 PM**

Tabla 12. Síntesis de valores obtenidos de 1-2 PM

	Potencia Máxima [W]	Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura °C
Caso 1	67,196	7°	45° Noreste	479	27,3
Caso 2	59,2	0°	180° Sur	306	28,2
Caso 3	54,339	10°	0° Norte	1007	27,4
Caso 4	53,9	7°	0° Norte	624	24,3
Caso 5	43,186	7°	225° Suroeste	925	28,2
Caso 6	41,658	7°	180° Sur	1078	29,7
Caso 7	52,419	0°	90° Este	1172	29,7
Caso 8	20,424	0°	315° Noroeste	174	23,9
Caso 9	44,4	10°	225° Suroeste	1023	29,7
Caso 10	40,831	10°	45° Noreste	995	29,3
Caso 11	35,64	10°	45° Noreste	279	21

Con referencia a la Tabla 12 el caso 1 presenta el valor de potencia máxima generada, y referenciándolo produce pérdidas en cuanto a eficiencia de 11,9% para el caso 2 y 19,1% para el caso 3. Asimismo para el caso 4 resultan pérdidas de 19,8%, con 145[W/m²] más y orientación cercana. De modo similar se presentan pérdidas de 35,7% en el caso 5, contando aun con 449[W/m²] más que en el caso 1 pero con un ángulo de orientación opuesto. Además para el caso 6 el porcentaje de pérdidas es de 38% incluso con 599[W/m²] más. De igual modo en la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos de las comparaciones realizadas en los otros casos.

Tal como se observa en la Tabla 13 para un ángulo de inclinación de 7°, cuando se varía la orientación un poco tanto como su índice de irradiancia, las pérdidas se presentan en menor grado. Más aún cuando la orientación e irradiancia se incrementan considerablemente, las pérdidas crecen de manera sustancial.

Tabla 13. Comparación de 1-2 PM

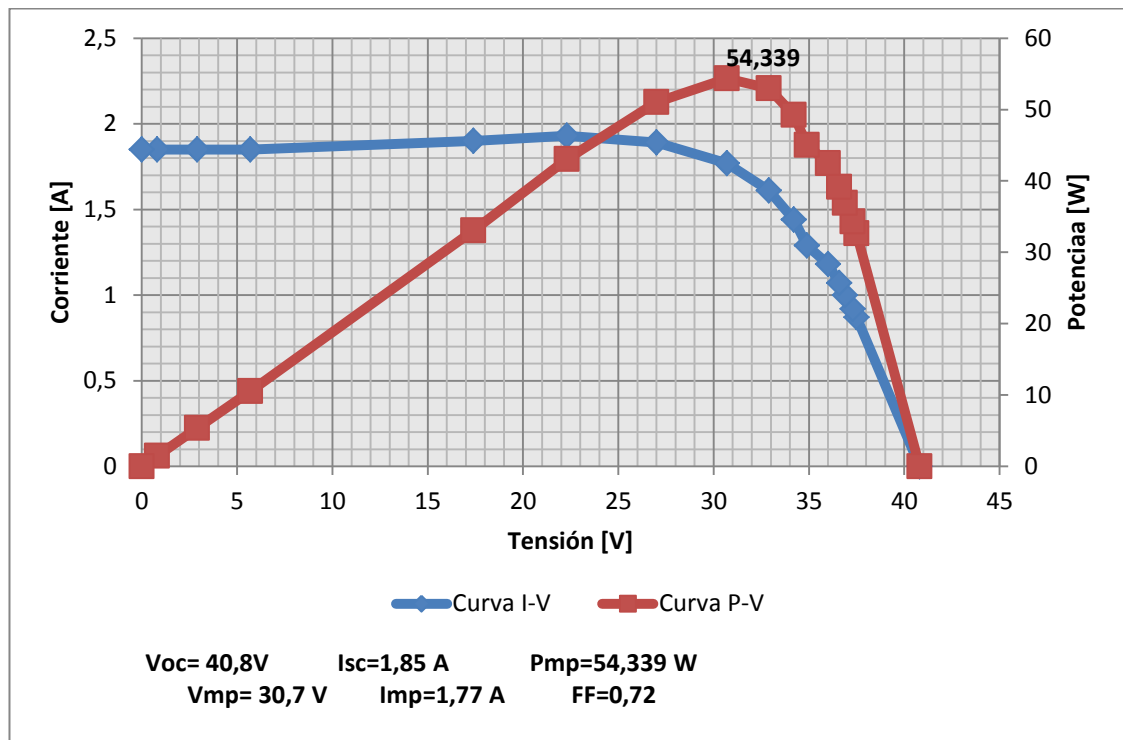
		Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura [°C]	Pérdida en Eficiencia
Caso 1	Caso 2	7° ↓	135° ↑	173 ↓	0,9 ↑	11,9%
	Caso 3	3° ↑	45° ↓	528 ↑	0,1 ↑	19,1%
	Caso 4	=	45° ↓	145 ↑	3 ↓	19,8%
	Caso 5	=	180° ↑	446 ↑	0,9 ↑	35,7%
	Caso 6	=	135° ↑	599 ↑	2,4 ↑	38%
Caso 2	Caso 7	=	90° ↓	866 ↑	1,5 ↑	11,5%
	Caso 8	=	270° ↑	132 ↓	4,3 ↓	65,6%
Caso 3	Caso 9	=	225° ↑	16 ↑	2,3 ↑	18,3%
	Caso 10	=	45° ↑	12 ↓	1,9 ↑	24,9%
	Caso 11	=	45° ↑	728 ↓	6,4 ↓	34,4%

En segunda instancia cabe señalar que para el ángulo de inclinación de 0°, el porcentaje de pérdidas disminuye ya que se ve afectado por una elevación significativa del índice de irradiancia, a pesar de la reducción en el ángulo de orientación. En cambio cuando se tiene una disminución no trascendental en el valor de irradiancia, pero si un movimiento notorio en el ángulo de orientación y temperatura, las pérdidas resultan más prominentes.

En consecuencia respecto al ángulo de inclinación de 10° se tienen valores de pérdidas cercanos cuando se manifiesta un cambio no sustancial en el índice de irradiancia y temperatura, aunque en orientación sea evidente la variación. Ahora bien el porcentaje de pérdidas mayor aparece a causa de un descenso desmesurado en el valor de irradiancia y temperatura.

Según se ha visto el rango de inclinación más adecuado esta entre $7^\circ - 10^\circ$, y el de orientación entre $315^\circ - 45^\circ$, con resultados más significativos en potencia generada.

Figura 12. Curvas características para $\beta=10^\circ$ y $\alpha=0^\circ$



Para el caso 3 de la Tabla 12 se ilustra en la Figura 12 las curvas características I-V y P-V. Con una tensión de circuito abierto de 40,8[V], corriente de corto circuito de 1,85[A], máxima potencia de 54,339[W], tensión en el punto de máxima potencia de 30,7[V], corriente en el punto de máxima potencia de 1,77[A] y factor forma 0,72.

- **Análisis de 2-3 PM**

Los 3 primeros casos de la Tabla 14 presentan los valores más significativos de potencia, y al ser comparados respecto al caso 1 se generan pérdidas de 10,5% y 13% para el caso 2 y 3 respectivamente. Al mismo tiempo para el caso 4 se tienen pérdidas de 16,6% con 680[W/m²] menos, mientras en el caso 5 las

pérdidas van hasta el 85,2% con una disminución de 72[W/m²] respecto al caso 1, y para el caso 6 el porcentaje de pérdidas llega al 91,6% aun con 127[W/m²] más. Todas estas observaciones también se encuentran para los demás casos en la tabla 15.

Tabla 14. Síntesis de valores obtenidos de 2-3 PM

	Potencia Máxima [W]	Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura °C
Caso 1	57,682	30°	45° Noreste	1023	29,2
Caso 2	51,625	7°	45° Noreste	1081	24,9
Caso 3	50,204	7°	45° Noreste	590	27,9
Caso 4	48,127	30°	90° Este	343	26,9
Caso 5	8,55	60°	270° Oeste	951	29,1
Caso 6	4,828	60°	135° Sureste	1150	28,7
Caso 7	42,757	7°	90° Este	789	30
Caso 8	41,334	7°	135° Sureste	803	28,6
Caso 9	34,347	10°	0° Norte	471	21,8
Caso 10	35,995	15°	315° Noroeste	434	28

Por lo que se refiere a la Tabla 15 se contempla que teniendo el ángulo de inclinación de 30° bajo una rotación leve en orientación, pero un mayor valor en la disminución del índice de irradiancia, se generan pérdidas menores al veinte por ciento.

En contraste al equipararse con inclinaciones de 60° que presentan más diferencia en el ángulo de orientación, pero muy poca en cuanto a índice de irradiancia, se producen pérdidas de más del ochenta por ciento.

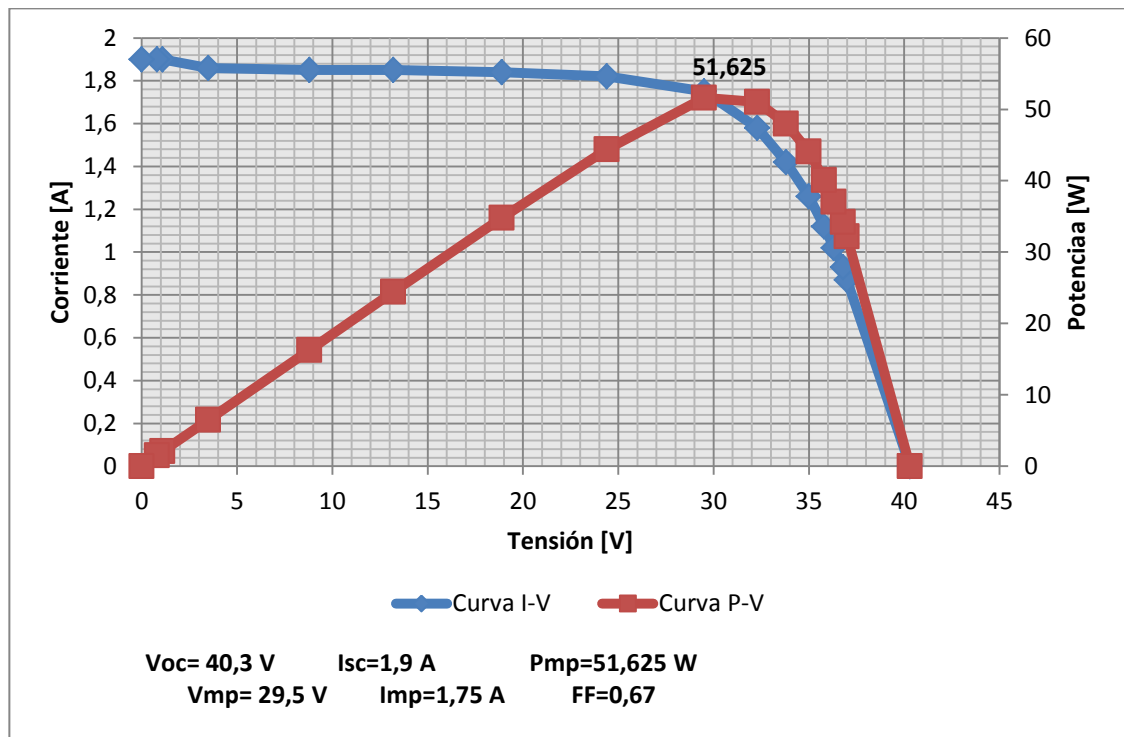
Tabla 15. Comparación de 2-3 PM

		Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura [°C]	Pérdida en Eficiencia
Caso 1	Caso 2	23° ↓	=	58 ↑	4,3 ↓	10,5%
	Caso 3	23° ↓	=	433 ↓	1,3 ↓	13%
	Caso 4	=	45° ↑	680 ↓	2,3 ↓	16,6%
	Caso 5	30° ↑	225° ↑	72 ↓	0,1 ↓	85,2%
	Caso 6	30° ↑	90 ↑	127 ↑	0,5 ↓	91,6%
Caso 2	Caso 7	=	45° ↑	292 ↓	5,1 ↑	17,2%
	Caso 8	=	90 ↑	278 ↓	3,7 ↑	19,9%
	Caso 9	3° ↑	45° ↓	610 ↓	3,1 ↓	33,5%
	Caso 10	8° ↑	270° ↑	647 ↓	3,1 ↑	30,3%
Caso 3	Caso 7	=	45° ↑	199 ↑	2,1 ↑	14,8%
	Caso 8	=	90 ↑	213 ↑	0,7 ↑	17,7%
	Caso 9	3° ↑	45° ↓	119 ↓	6,1 ↓	31,6%
	Caso 10	8° ↑	270° ↑	156 ↓	0,1 ↑	28,3%

Ahora bien cuando se contrastan los datos obtenidos para una inclinación de 10° y 15°, respecto a 7° de inclinación, en general se presentan pérdidas en promedio de un treinta por ciento, con modificaciones considerables en índices de irradiancia y orientación.

En referencia a lo anterior, se clasifica el rango de inclinación más favorable entre 7° - 15°, y la orientación entre 315° - 45°, con resultados más eficientes.

Figura 13. Curvas características para $\beta=7^\circ$ y $\alpha=45^\circ$



La Figura 13 expone las curvas características I-V y P-V del caso 2 de la Tabla 14. Revelando una tensión de circuito abierto de 40,3[V], corriente de corto circuito de 1,9[A], máxima potencia de 51,625[W], tensión en el punto de máxima potencia de 29,5[V], corriente en el punto de máxima potencia de 1,75[A] y factor forma 0,67.

- **Análisis de 3-4 PM**

Haciendo alusión a la Tabla 16 el caso 1 presenta el dato de máxima potencia y genera pérdidas en cuanto a eficiencia de 1,7% para el caso 2 y 3,3% para el caso 3. De esta manera en el caso 4 resultan pérdidas de 8,7% con 193[W/m²] menos y teniendo la misma orientación. A su vez se dan pérdidas para el caso 5 de 10,5% y de 10,7% para el caso 6 con 217[W/m²] más, ambos con orientación cercana a la del caso 1. De manera semejante se exhiben en la Tabla 17, los resultados obtenidos de las comparaciones realizadas para los demás casos.

Tabla 16. Síntesis de valores obtenidos de 3-4 PM

	Potencia Máxima [W]	Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura °C
Caso 1	44,85	10°	45° Noreste	495	24,1
Caso 2	44,1	4°	90° Este	738	26,8
Caso 3	43,364	30°	90° Este	831	27,3
Caso 4	40,948	10°	45° Noreste	302	25,1
Caso 5	40,119	10°	90° Este	524	28,7
Caso 6	40,04	10°	90° Este	712	28,9
Caso 7	42,742	4°	45° Noreste	512	26,1
Caso 8	37,004	7°	45° Noreste	890	28,3
Caso 9	39,79	30°	45° Noreste	1016	28,4
Caso 10	23,639	60°	0° Norte	571	27,8

Tabla 17. Comparación de 3-4 PM

		Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura [°C]	Pérdida en Eficiencia
Caso 1	Caso 2	6° ↓	45° ↑	243 ↑	2,7 ↑	1,7%
	Caso 3	20° ↑	45° ↑	336 ↑	3,2 ↑	3,3%
	Caso 4	=	=	193 ↓	1 ↑	8,7%
	Caso 5	=	45° ↑	29 ↑	4,6 ↑	10,5%
	Caso 6	=	45° ↑	217 ↑	4,8 ↑	10,7%
Caso 2	Caso 7	=	45° ↓	226 ↓	0,7 ↓	3,1%
	Caso 8	3° ↑	45° ↓	152 ↑	1,5 ↑	16,1%
Caso 3	Caso 9	=	45° ↓	185 ↑	1,1 ↑	8,2%
	Caso 10	30° ↑	90° ↓	260 ↓	0,5 ↑	45,5%

En la Tabla 17 se evidencia en general pérdidas reducidas, como por ejemplo se tiene con un ángulo de inclinación de 10° que aun presentando disminución o aumento en el índice de irradiancia, y conservando o variando de manera leve la orientación, ocasiona pérdidas en promedio de un diez por ciento.

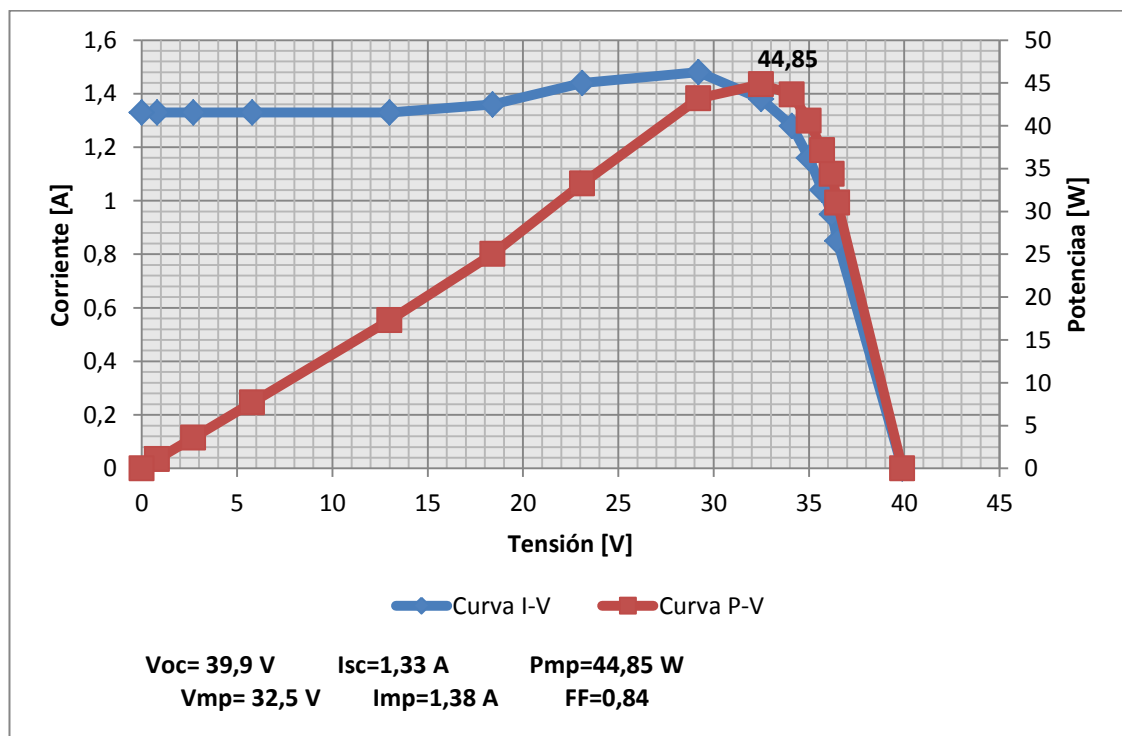
En relación al ángulo de inclinación de 4°, se observa que a pesar de darse una reducción importante en el índice de irradiancia, y poca variación en

orientación, ocasiona pérdidas menores. En cambio al compararse con una inclinación de 7° que presenta incluso mayor irradiancia y aproximadamente la misma orientación, las pérdidas aumentan considerablemente.

De manera que sucede algo similar para las comparaciones de 30° de inclinación, ya que al aumentar el valor de irradiancia y darse una variación leve en la orientación, se entregan pérdidas menores como en el caso 9. No obstante al relacionarse con el ángulo de inclinación de 60° y manifestarse una incidencia menor en irradiancia, tanto como un cambio de orientación no abrupto, se entregan pérdidas cinco veces mayor al anterior.

Después de lo expuesto se considera el rango de inclinación más adecuado entre $7^\circ - 10^\circ$ y el rango de orientación entre $0^\circ - 90^\circ$ por su permanencia en valores de mayor potencia.

Figura 14. Curvas características para $\beta=10^\circ$ y $\alpha=45^\circ$



En la Figura 14 se distinguen las curvas características I-V y P-V para el caso 1 de la Tabla 16. Mostrando una tensión de circuito abierto de 39,9[V], corriente de corto circuito de 1,33[A], máxima potencia de 44,85[W], tensión en el punto de máxima potencia de 32,5[V], corriente en el punto de máxima potencia de 1,38[A] y factor forma 0,84.

- **Análisis de 4-5 PM**

Equiparando los 3 primeros casos de la Tabla 18 las pérdidas en eficiencia para los casos 2 y 3 son de 40,2% y 50,6% respectivamente, esto en relación al caso 1. Igualmente para el caso 4 se presentan pérdidas de 99,9% con 302[W/m²] menos e igual orientación. Además para los casos 5 y 6 las pérdidas son de 84,4% y de 98,6% correspondientemente. Ambos con orientación cercana a la del caso 1. En este mismo orden y dirección se contempla en la Tabla 19 el efecto de las comparaciones hechas en los demás casos.

Tabla 18. Síntesis de valores obtenidos de 4-5 PM

	Potencia Máxima [W]	Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura °C
Caso 1	54,435	60°	0° Norte	515	29
Caso 2	32,55	30°	135° Sureste	599	28
Caso 3	26,88	4°	45° Noreste	849	27,5
Caso 4	0,08	60°	0° Norte	213	26,8
Caso 5	8,492	30°	315° Noroeste	438	28
Caso 6	0,768	30°	45° Noreste	292	25,5
Caso 7	15,982	4°	270° Oeste	410	28,5
Caso 8	25,6	10°	0° Norte	506	27,9
Caso 9	25,179	10°	90° Este	747	26
Caso 10	11,076	10°	135° Sureste	345	25,3

En primer lugar la Tabla 19 señala los resultados arrojados para las comparaciones hechas con un ángulo de inclinación de 60°, donde en general se obtuvieron porcentaje de pérdidas elevados, casi del cien por ciento para

una misma inclinación y orientación, con una considerable reducción en el índice de irradiancia. Se presenta del mismo modo para comparaciones con 30° de inclinación, donde contando con diferentes variaciones en orientación e irradiancia se siguen presentando porcentaje de pérdidas cuantiosos.

Con referencia a lo anterior sucede una situación semejante al tener como referencia una inclinación de 30° y en base a ésta hacerse comparaciones tanto para un mismo ángulo de inclinación como para uno de 60°. Las pérdidas siguen siendo bastante elevadas como en el caso expuesto anteriormente, bajo circunstancias similares en cuanto a variación de irradiancia y orientación.

Tabla 19. Comparación de 4-5 PM

		Inclinación (β)	Orientación (α)	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura [°C]	Pérdida en Eficiencia
Caso 1	Caso 2	30° ↓	135° ↑	84 ↑	1 ↓	40,2%
	Caso 3	56° ↓	45° ↑	334 ↑	1,5 ↓	50,6%
	Caso 4	=	=	302 ↓	2,2 ↓	99,9%
	Caso 5	30° ↓	315° ↑	77 ↓	1 ↓	84,4%
	Caso 6	30° ↓	45° ↑	223 ↓	3,5 ↓	98,6%
Caso 2	Caso 4	30° ↑	135° ↓	386 ↓	1,2 ↓	99,8%
	Caso 5	=	180° ↑	161 ↓	=	73,9%
	Caso 6	=	90° ↓	307 ↓	2,5 ↓	97,6%
Caso 3	Caso 7	=	135° ↑	439 ↓	1 ↑	40,5%
	Caso 8	6° ↑	45° ↓	343 ↓	0,4 ↑	4,8%
	Caso 9	6° ↑	45° ↑	102 ↓	1,5 ↓	6,3%
	Caso 10	6° ↑	90° ↑	504 ↓	2,2 ↓	58,8%

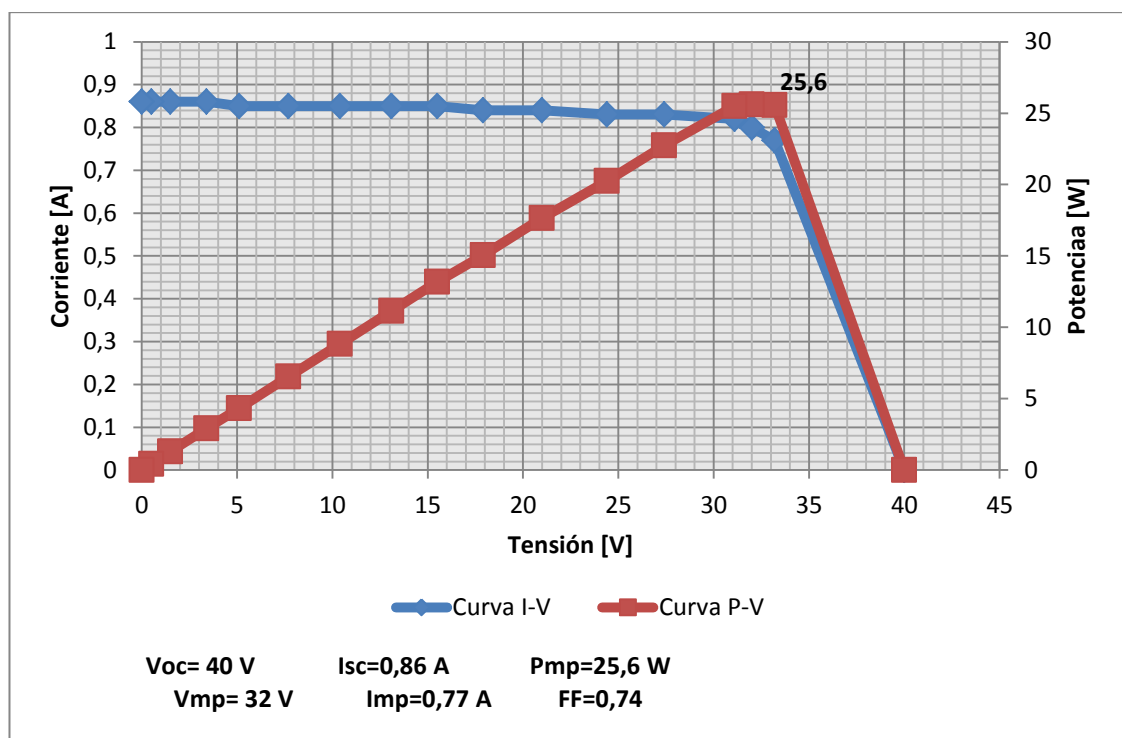
Mientras tanto cuando se tiene una inclinación de 4° como referente y se equipara con un caso donde se mantiene la inclinación y se varía de forma casi opuesta la orientación, además de una elevada disminución en el índice de irradiancia, se logra obtener pérdidas en el orden del cuarenta por ciento. De igual manera para cuando se relaciona con una inclinación de 10°, en donde

existe cierta variación en orientación, pero una disminución en más de la mitad del índice de irradiancia, se producen pérdidas de casi el sesenta por ciento.

Al contrario se observa claramente que si la inclinación de 10° presenta baja variación en el ángulo de orientación, e incluso valores del índice de irradiancia reducidos en mediana o baja proporción, las pérdidas no superan el siete por ciento.

De acuerdo con los razonamientos que se han venido realizando, se estima una inclinación más eficiente de 10° , en un rango de orientación entre $0^\circ - 90^\circ$ por su óptimo desempeño.

Figura 15. Curvas características para $\beta=10^\circ$ y $\alpha=0^\circ$



En la Figura 15 se visualizan las curvas características I-V y P-V para el caso 8 de la Tabla 18. Con una tensión de circuito abierto de 40[V], corriente de corto circuito de 0,86[A], máxima potencia de 25,6[W], tensión en el punto de máxima potencia de 32[V], corriente en el punto de máxima potencia de 0,77[A] y factor forma 0,74.

Tabla 20. Síntesis final

	Inclinación (β)	Orientación (α)	Potencia Máxima (W)
8-9 am.	10°	270° - 315°	48,43
9-10 am.	10°	270° - 315°	52,19
10-11 am.	7° - 10°	270° - 0°	57,036
11-12 pm.	4° - 10°	270° - 0°	59,409
12-1 pm.	4° - 10°	315° - 45°	58,206
1-2 pm.	7° - 10°	315° - 45°	67,196
2-3 pm.	7°	315° - 45°	57,682
3-4 pm.	7° - 10°	0° - 90°	44,85
4-5 pm.	10°	0° - 90°	54,435

A lo largo del presente estudio se logró evidenciar de qué manera influyen las variables de inclinación, orientación y especialmente la irradiancia en la producción energética por parte de una instalación fotovoltaica. Se presentaron casos particulares donde a partir de comparaciones realizadas, se encontraron respuestas más favorables dependiendo de ciertas condiciones de operación y medio ambientales.

Teniendo presente la época del año en la que se realizó dicho estudio, se obtuvo rangos de inclinación y orientación más adecuados a implementar, teniendo en cuenta que con estos se logró un nivel de eficiencia más elevado. En la Tabla 20 se evidencia un resumen de lo anterior, seccionado por hora con la intención de ser más específicos en los datos obtenidos.

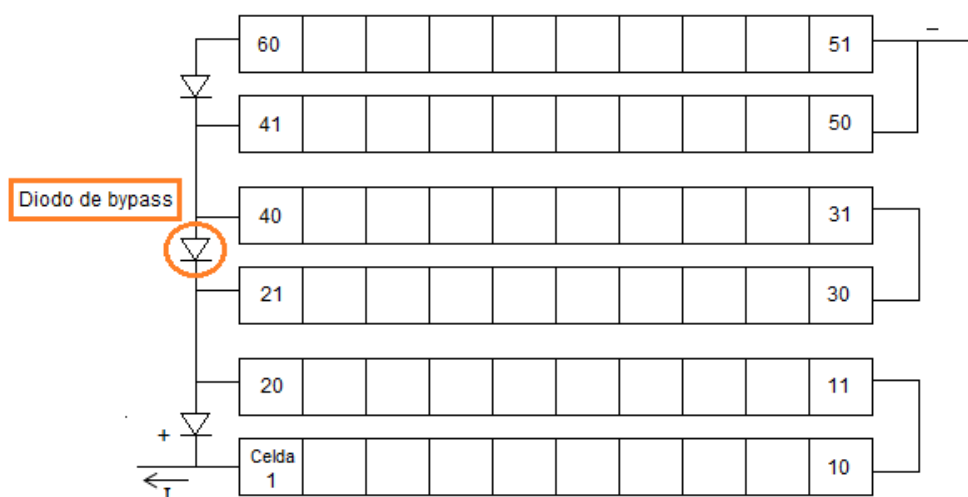
Lo dicho hasta aquí supone como caso general, el uso de una inclinación de 10° en un rango de orientación entre 315° - 45°, debido a que estos valores hacen presencia de una manera notoria en el objetivo de generar la mayor potencia posible.

7. ANÁLISIS DE SOMBRAS

Para comprender mejor el efecto de las sombras sobre la superficie de un panel fotovoltaico, se trabajó a partir de los resultados obtenidos de acuerdo a las curvas características I-V y P-V de dos paneles con referencia UP-M250P. Inicialmente se realizaron pruebas sin sombra para uno de ellos y luego con los dos paneles conectados en serie, con la finalidad de que fuesen la referencia al momento de analizar pérdidas a partir de la presencia de diferentes tipos de sombreado.

Es importante destacar que cada panel fotovoltaico utilizado para estas pruebas, está compuesto por tres cadenas de veinte celdas fotovoltaicas conectadas en serie. En cada una de las tres cadenas se tiene un diodo en paralelo llamado diodo de bypass (ver Figura 16). La función de este elemento electrónico consiste en permitir el flujo de corriente en un único sentido, protegiendo de esta manera a cada una de las cadenas de celdas de posibles daños producidos por sombras parciales.

Figura 16. Diodos de bypass



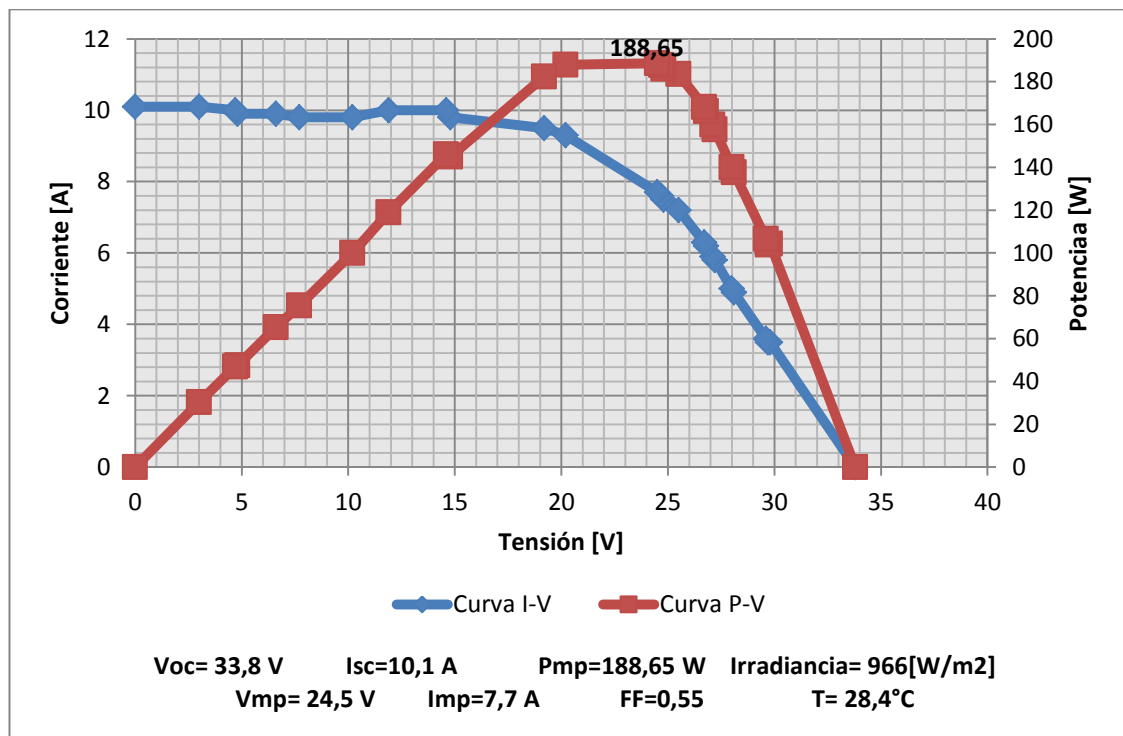
De acuerdo a los resultados del estudio anterior y a la época del año en la que se realizó este análisis de sombras, se fijaron los paneles fotovoltaicos a una

inclinación de 10° y orientados al Sur. Los primeros resultados plasmados a continuación, hacen referencia a un solo panel fotovoltaico operado de manera individual. Así mismo se contemplara posteriormente los efectos producidos en dos de ellos conectados en serie.

7.1 ANÁLISIS DE SOMBRAS PARA UN SOLO PANEL FOTOVOLTAICO

En la Figura 17 se ilustran las curvas características I-V y P-V para el panel fotovoltaico en ausencia de sombra, con unas condiciones de irradiancia y temperatura de 966[W/m²] y 28,4°C respectivamente. La tensión de circuito abierto obtenida fue de 44,8[V], con una corriente de corto circuito de 10,1[A], máxima potencia de 188,65[W], tensión en el punto de máxima potencia de 24,5[V], corriente en el punto de máxima potencia de 7,7[A] y factor forma 0,55.

Figura 17. Curvas características del panel fotovoltaico sin sombra



A continuación se presentan diferentes casos de sombras que se llevaron a cabo al superponer cartón sobre la superficie del panel fotovoltaico. En cada uno de estos se encuentra una gráfica que contiene las curvas características I-V y P-V del caso en particular estudiado, representadas en color verde y morado respectivamente. Además se incluyen las curvas que se tienen de la Figura 17 las cuales actúan como referencia.

- **Caso 1. Primera fila de celdas con sombra**

En este caso se acomodó una sombra en la primera fila del panel fotovoltaico, tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 18. Sombra en la primera fila del panel

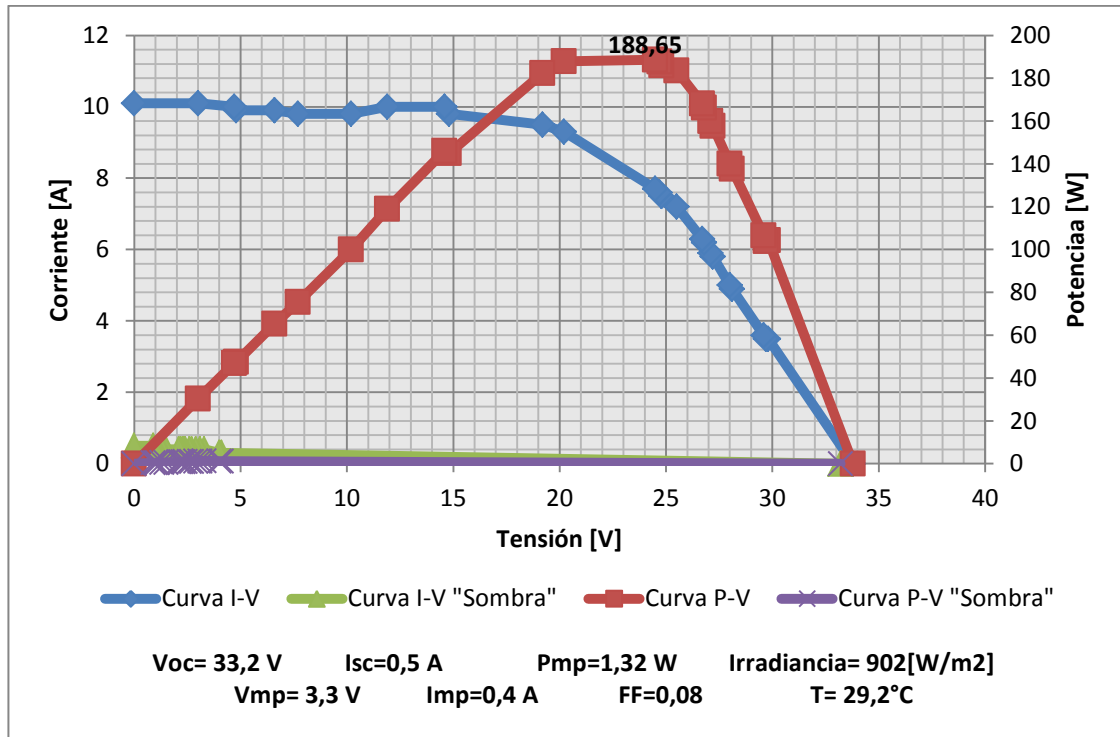


Comparando las curvas de la Figura 19 donde se miden los mismos parámetros en condiciones de sombra o en ausencia de ella, se observa que la diferencia más importante viene dada por la corriente eléctrica cuyo valor registra tan solo 0,5[A], mientras que la tensión no presenta un cambio excesivo.

Teniendo en cuenta la configuración del panel, formado por tres cadenas de veinte celdas conectadas en serie y distribuidas en forma de tres "U", visto desde la posición vertical que presenta el mismo (ver Figura 18), lo que conlleva a tener la misma cantidad de sombra en cada una de las cadenas,

permitiendo atribuir a este causa las grandes pérdidas de 99,3% con referencia a los datos de control.

Figura 19. Curvas características para sombra en la primera fila del panel



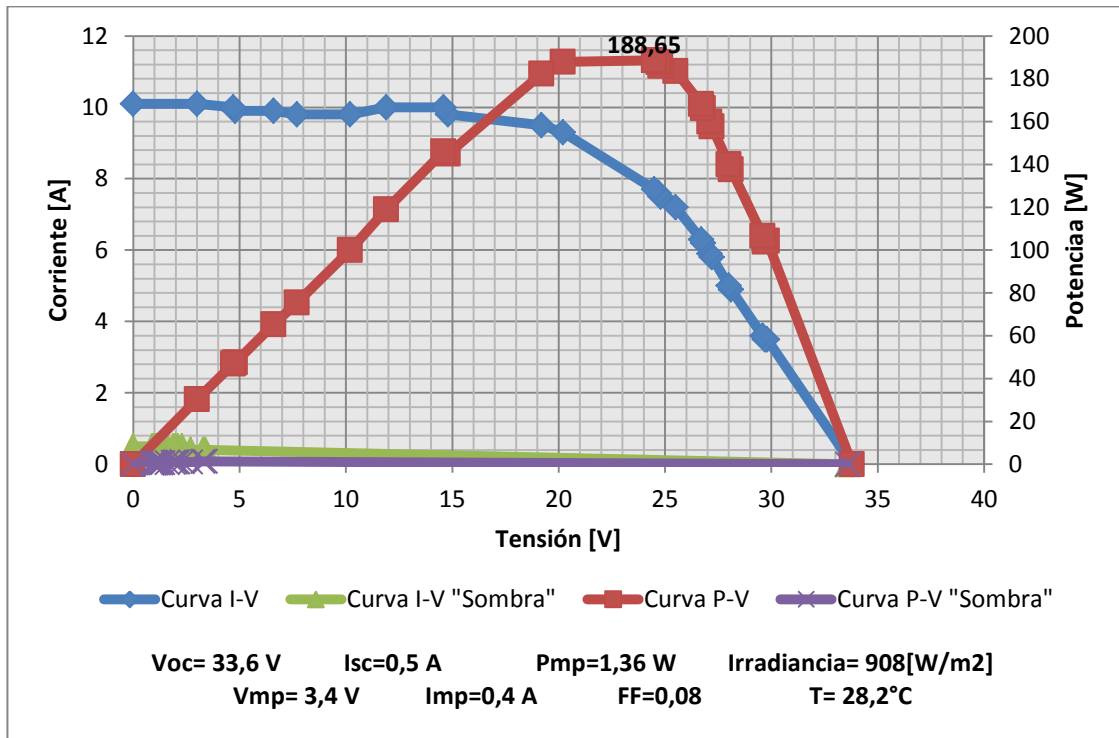
- **Caso 2. Quinta fila de celdas con sombra**

Para esta prueba se tuvo un caso muy parecido al anterior, pero en vez de tapar la primera fila de celdas, se realizó sobre la quinta fila como se muestra a continuación.

Figura 20. Sombra en la quinta fila del panel



Figura 21. Curvas características para sombra en la quinta fila del panel



Para este caso igual que en el anterior, el tener una sombra horizontal cuando los paneles están puestos verticalmente, representa una incidencia directa en todas sus cadenas de celdas, repercutiendo de esta manera en una considerable disminución de la corriente producida (ver Figura 21), al punto de producirse pérdidas de 99,3%.

Así mismo se observa que no existe una diferencia notoria en cuanto a que la sombra horizontal se presente en la primera o quinta fila del panel, teniendo sentido ya que en ambos casos se cubre la misma cantidad de celdas en cada cadena.

- **Caso 3. Primera columna de celdas con sombra**

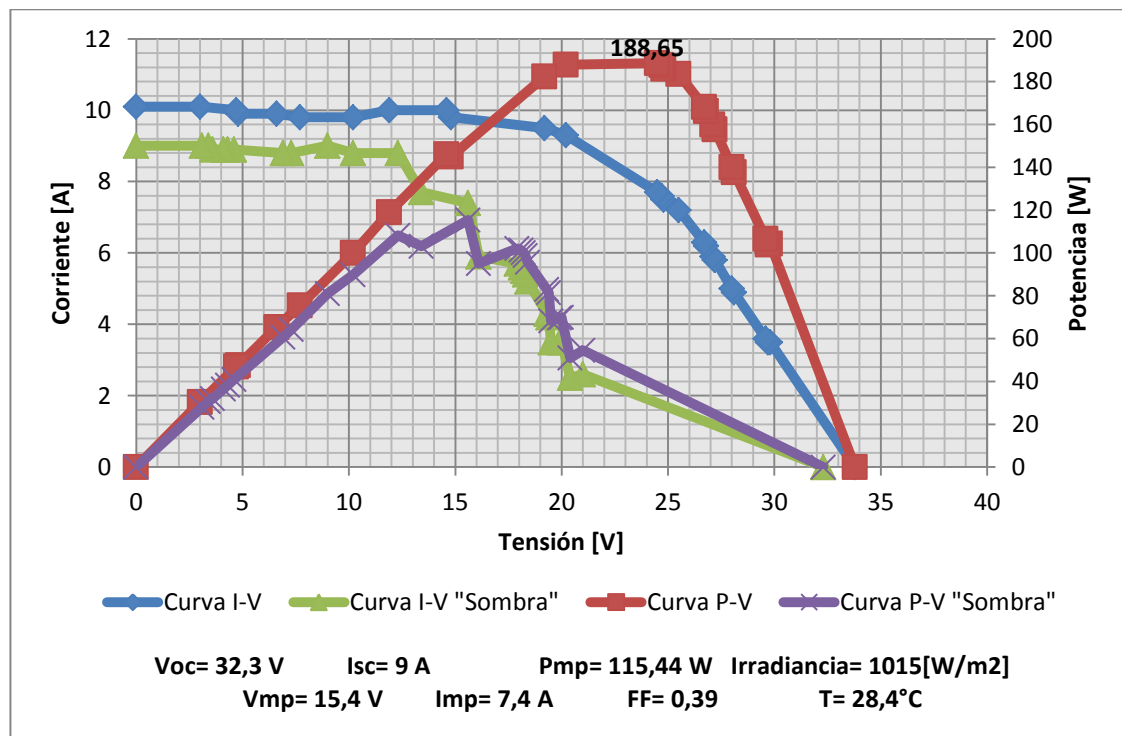
Tras haber comprobado en los casos anteriores, la manera en la que repercute una sombra horizontal en un panel, disminuyendo considerablemente el valor de la

corriente, se quiso evaluar en este caso la forma de influir de una sombra como la de la Figura 22.

Figura 22. Sombra en la primera columna del panel



Figura 23. Curvas características para sombra en la primera columna del panel



Teniendo en cuenta las conexiones internas del panel, se puede inferir que esta sombra solo repercute en una de las cadenas de celdas del mismo, notándose en la Figura 23, como la corriente se ve mermada pero no de forma

general como en los casos anteriores, sino más bien de forma parcial, presentándose una disminución de 10,9% en el valor de corriente máxima, por lo tanto las pérdidas en este caso representan un 38,8%.

- **Caso 4. Cuarta columna de celdas con sombra**

Como se puede observar en la Figura 24 en este caso se tiene una sombra similar a la del caso anterior, tapándose de esta manera toda la cuarta columna del panel.

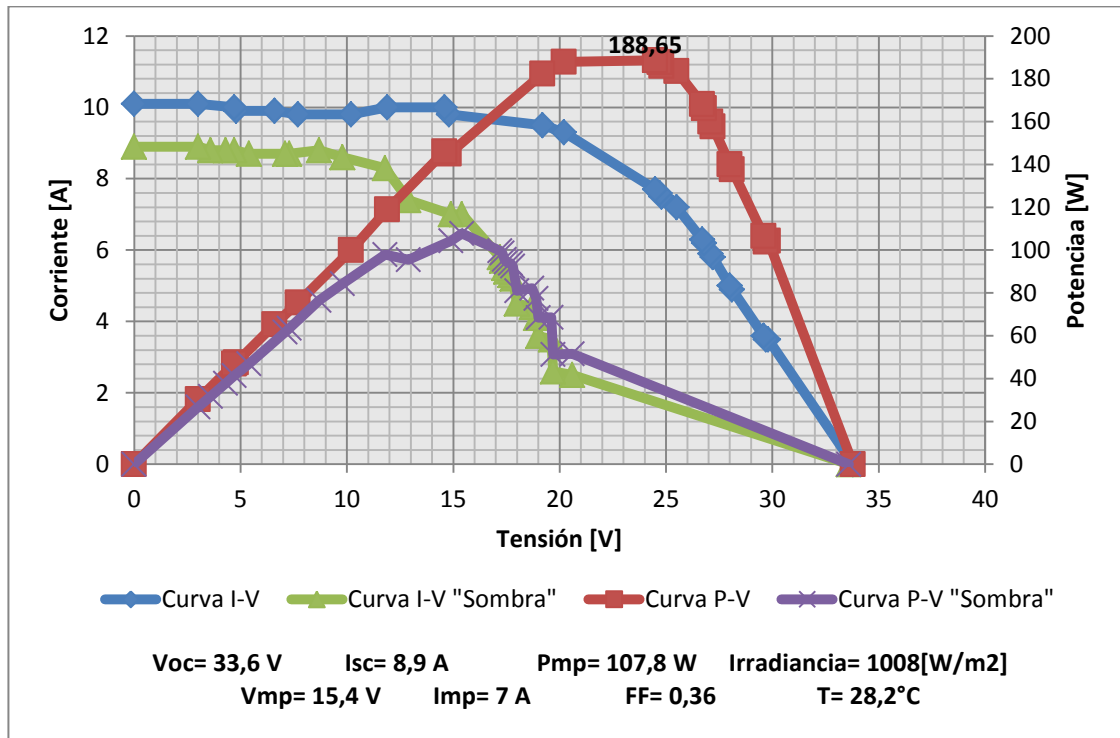
Figura 24. Sombra en la cuarta columna del panel



Los resultados que se tienen de la Figura 25 resultan ser bastante semejantes a los obtenidos en el caso 3, siendo algo esperado teniendo en cuenta que la sombra repercute directamente sobre una sola de las cadenas de celdas y en igual proporción al caso anterior, obteniéndose valores de corriente disminuidos parcialmente y arrojando pérdidas de 42,9%.

Del mismo modo que en los casos 1 y 2 para los casos 3 y 4 no se presenta gran diferencia al poner la sombra sobre alguna columna de celdas específica del panel.

Figura 25. Curvas características para sombra en la cuarta columna del panel



- **Caso 5. Tercera fila y columna de celdas con sombra**

En este caso se acomodó una sombra semejante a una cruz, tapándose la fila y columna número tres del panel fotovoltaico, tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 26. Sombra en la tercera fila y columna

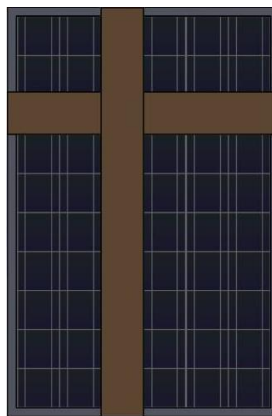
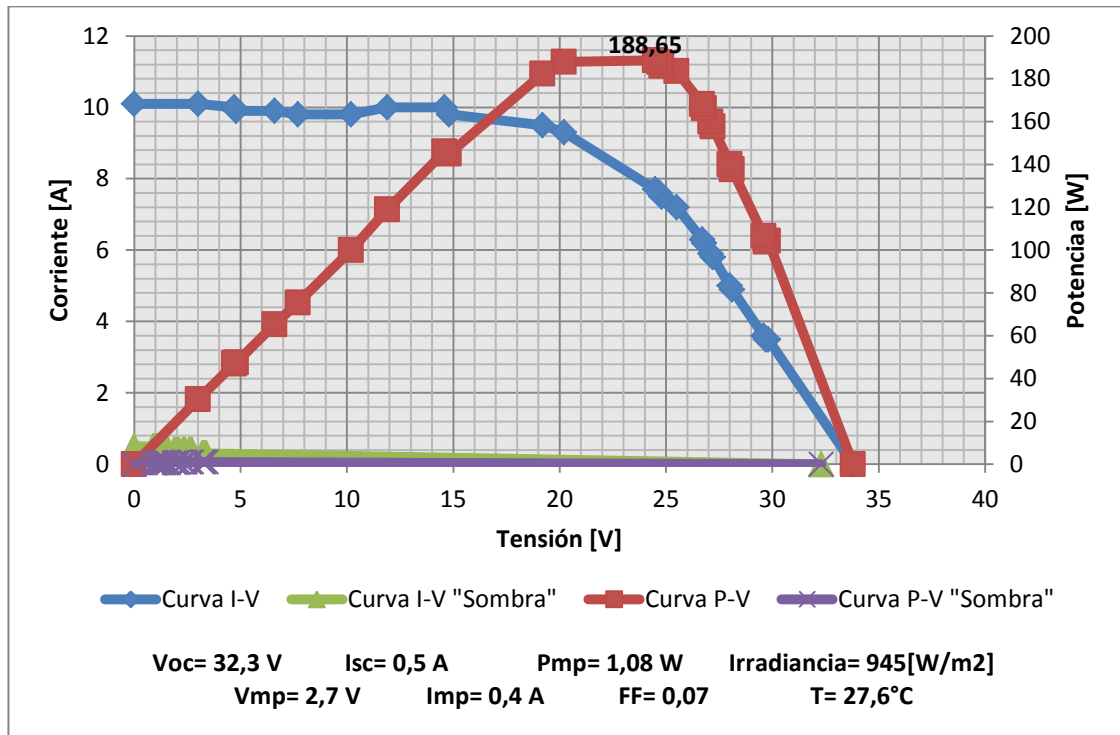


Figura 27. Curvas características con sombra en la tercera fila y columna

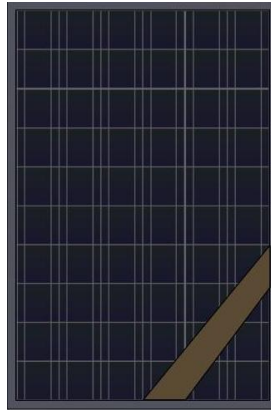


Los resultados de esta prueba se pueden ver en la Figura 27, igual de negativos en cuanto a pérdidas elevadas en el orden de 99,4%, lo que no resulta extraño teniendo en cuenta que el tipo de sombreado representa una combinación de los casos anteriores, presentándose en general una mayor proporción de sombras.

- **Caso 6. Diagonal con sombra**

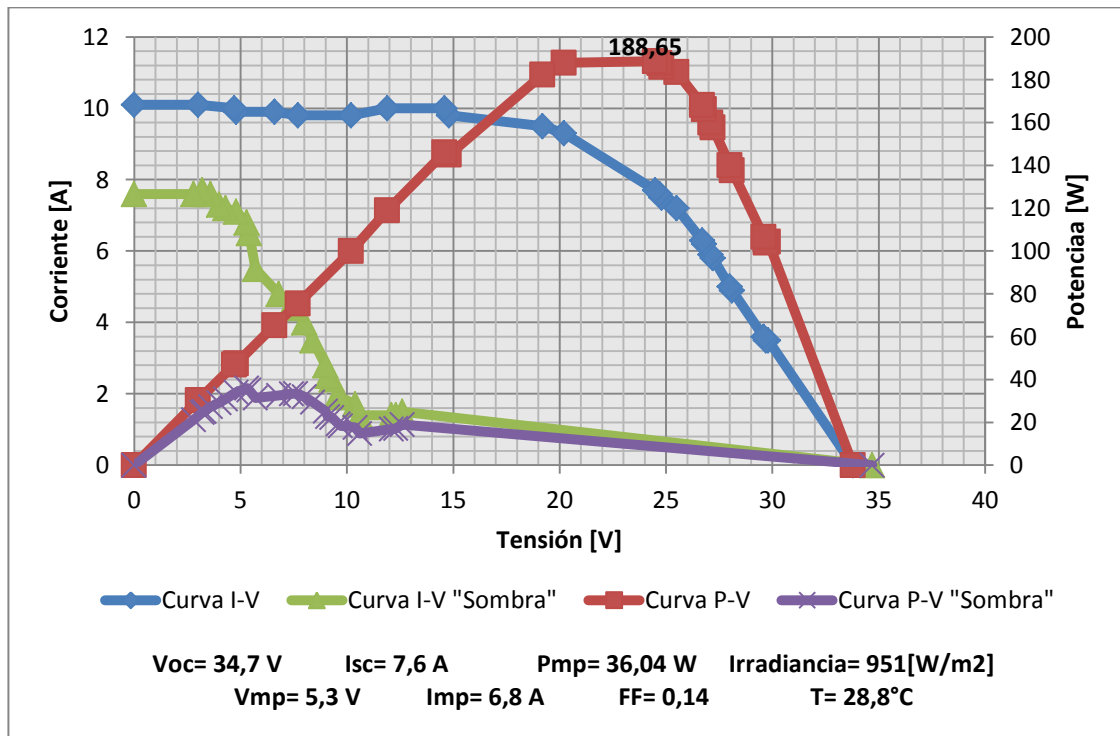
Para este caso se aplicó una sombra en diagonal como la observada en la Figura 28, incidiendo sobre distintas celdas de dos cadenas en particular.

Figura 28. Sombra en diagonal



En la Figura 29 se puede visualizar la forma en la que la corriente del panel disminuye paulatinamente a partir de los 5[V], dejando en evidencia los efectos de este tipo de sombreado, en el que solo una cadena de celdas produce completamente aun así alcanzando pérdidas de 80,9%.

Figura 29. Curvas características para sombra en diagonal



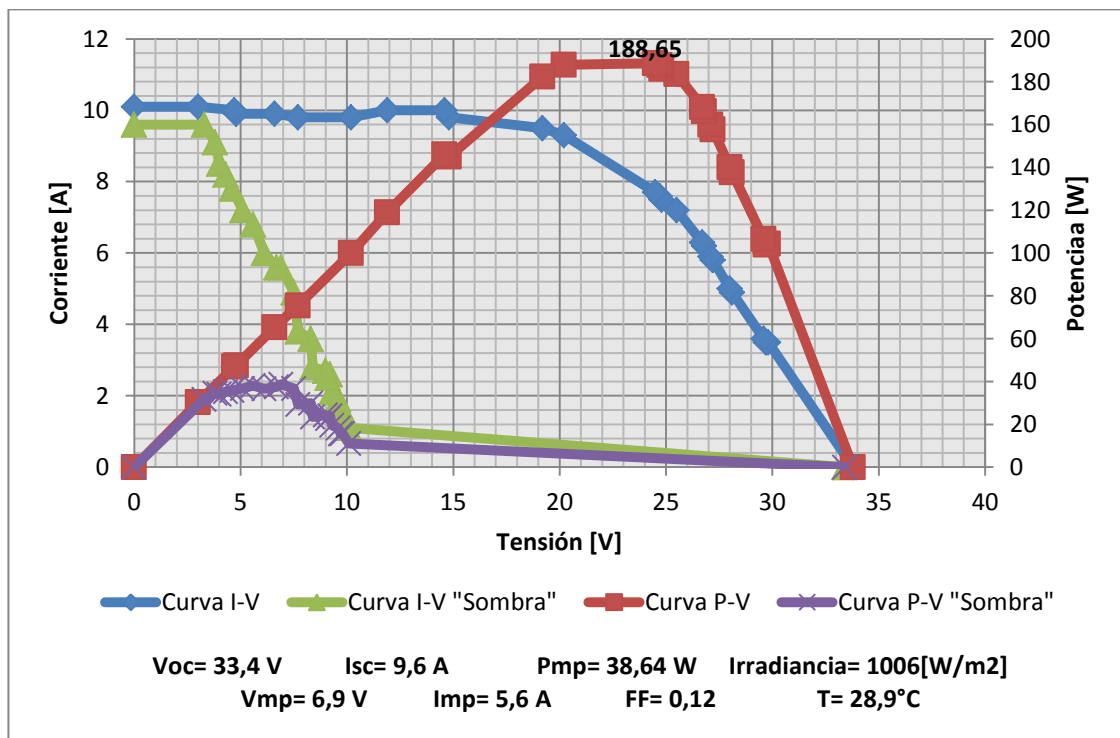
- **Caso 7. Tres celdas horizontales en la última fila con sombra**

En este caso se puso un sombreado como el que se muestra en la Figura 30, semejante al caso anterior en cuanto a la proporción de la cantidad de celdas cubiertas.

Figura 30. Sombra en tres celdas horizontales



Figura 31. Curvas características con sombra de tres celdas horizontales



La Figura 31 permite observar los resultados obtenidos para esta prueba, siendo semejantes al caso anterior, evidenciando nuevamente como influye el sombreado sobre dos de las cadenas de celdas del panel, presentando una disminución considerable en el valor de la corriente a partir de los 4[V] arrojando pérdidas de 79,5%.

- **Caso 8. Tres celdas verticales en la segunda columna con sombra**

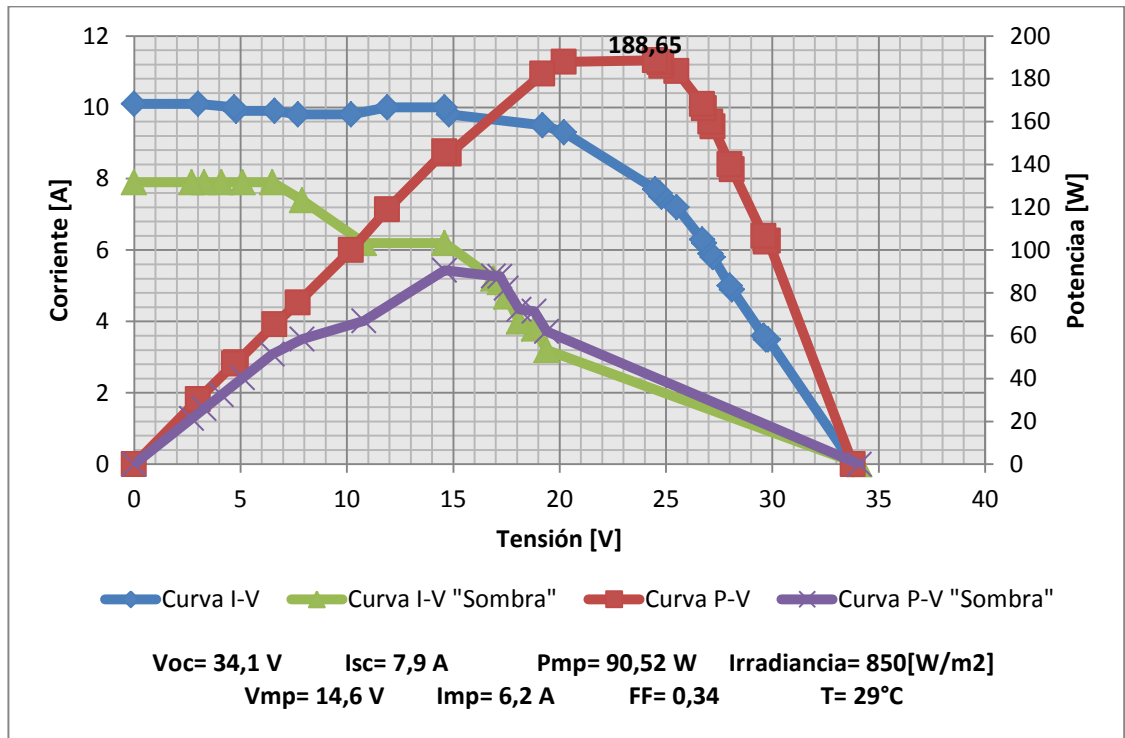
En la Figura 32 se exhibe la forma en que se dispuso la sombra para esta prueba, consistiendo en tapan tres celdas en serie de la segunda columna del panel.

Figura 32. Sombra en tres celdas verticales



El la Figura 33 se puede visualizar el efecto producido por el sombreado de tres celdas de una misma cadena, generando una caída notoria en el valor de la corriente a partir de los 7[V] y unas pérdidas de 52%.

Figura 33. Curvas características con sombra en tres celdas verticales



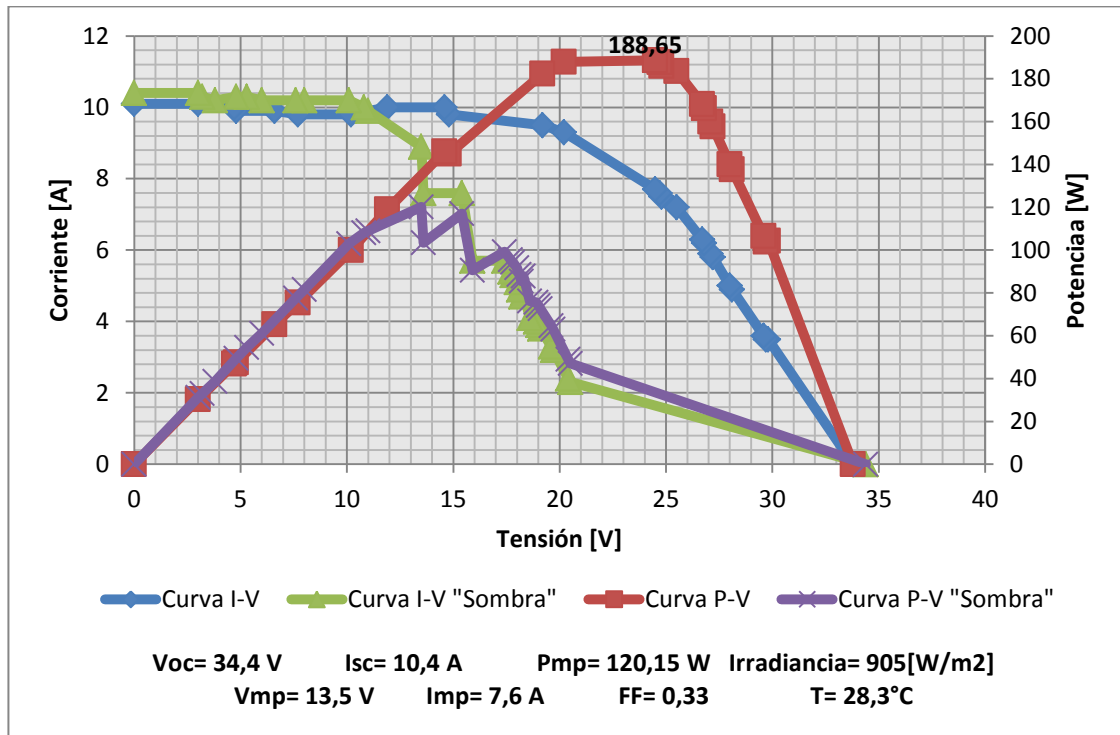
- **Caso 9. Una celda en una esquina con sombra**

Después de haber realizado diversos casos con sombras donde se han visto afectadas gran cantidad de celdas en un mismo panel, se quiso sombrear una sola celda en una de las esquinas del mismo, y así tener un balance del efecto producido por una de las sombras más pequeñas estudiadas hasta ahora. La Figura 34 presenta un bosquejo del tipo de sombra.

Figura 34. Sombra en una esquina



Figura 35. Curvas características con sombra en una esquina



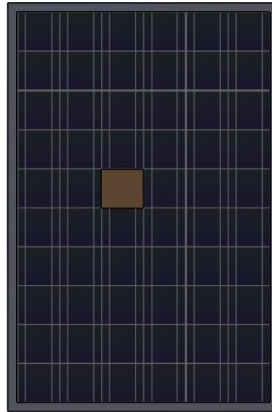
Por medio de la Figura 35 se puede tener un estimado del efecto que produce una sombra que podría ser considerada por muchos como menor. Se aprecia como la corriente disminuye sustancialmente a partir de los 11[V] y termina produciendo pérdidas de 36,3% pudiendo ser considerables.

Se puede comparar este caso con las heces de aves que pueden llegar a encontrar en algunas instalaciones fotovoltaicas, por esto resulta importante programar jornadas de limpieza según la situación y el entorno en que se encuentre.

- **Caso 10. Una sola celda en el medio con sombra**

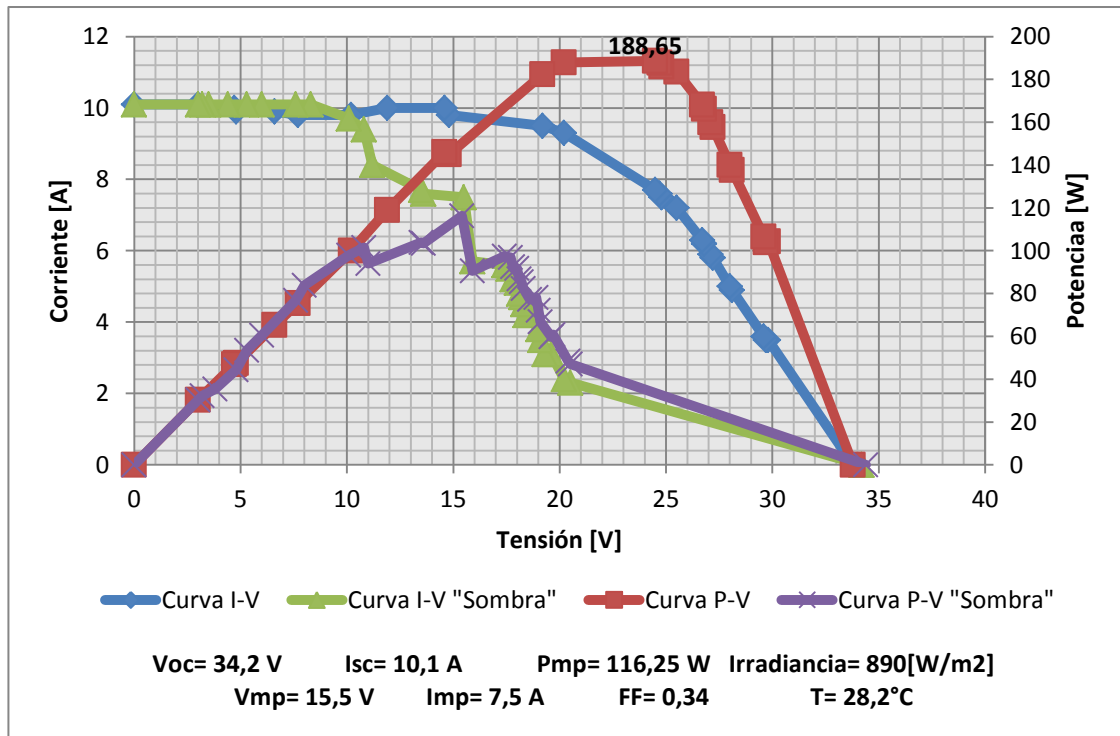
Teniendo en cuenta los casos iniciales del estudio de sombras, se quiso modificar el caso anterior de la manera en que se encuentra en la Figura 36.

Figura 36. Sombra en una celda en la mitad



Los resultados arrojados en la Figura 37 resultan en este caso esperados, teniendo en cuenta el comportamiento que se presentó en los primeros cuatro casos del inicio del estudio de sombras. Se ve una disminución sustancial en el valor de la corriente a partir de los 10[V] produciendo pérdidas de 38,4%.

Figura 37. Curvas características con sombra en una sola celda en la mitad



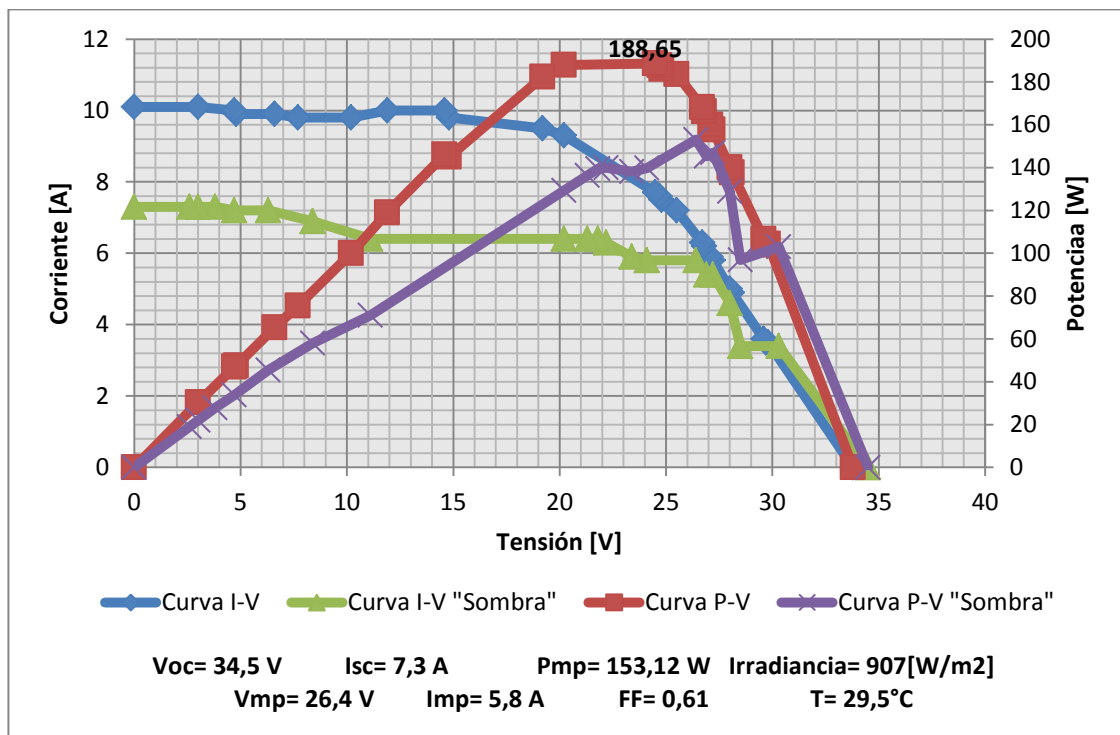
- **Caso 11. Sombra con hojas de árboles**

Pensando en un tipo de sombra que podría presentarse de manera mas natural según las condiciones del entorno, se estableció generar sombras con tres hojas sobre la superficie del panel, la Figura 38 exhibe una idea de ello.

Figura 38. Sombra con hojas de árboles



Figura 39. Curvas características para sombra con hojas de árboles

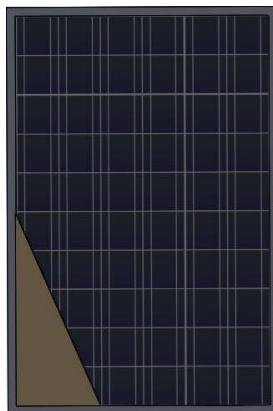


La Figura 39 muestra los resultados que se obtuvieron al realizar esta prueba de sombra, en donde se aprecia la incidencia que se tiene en general con cada cadena de celdas, disminuyendo en cierta proporción la corriente alcanzada. Cada una de estas hojas cubría en promedio un 40% del tamaño de cada celda sobre la que posaba, alcanzándose unas pérdidas de 18,8%. Según se puede observar en la curva morada (curva P-V) de la Figura 39, se presentan tres máximos locales de potencia y un solo máximo global debido a las sombras parciales.

- **Caso 12. Sombra producida por una edificación cercana**

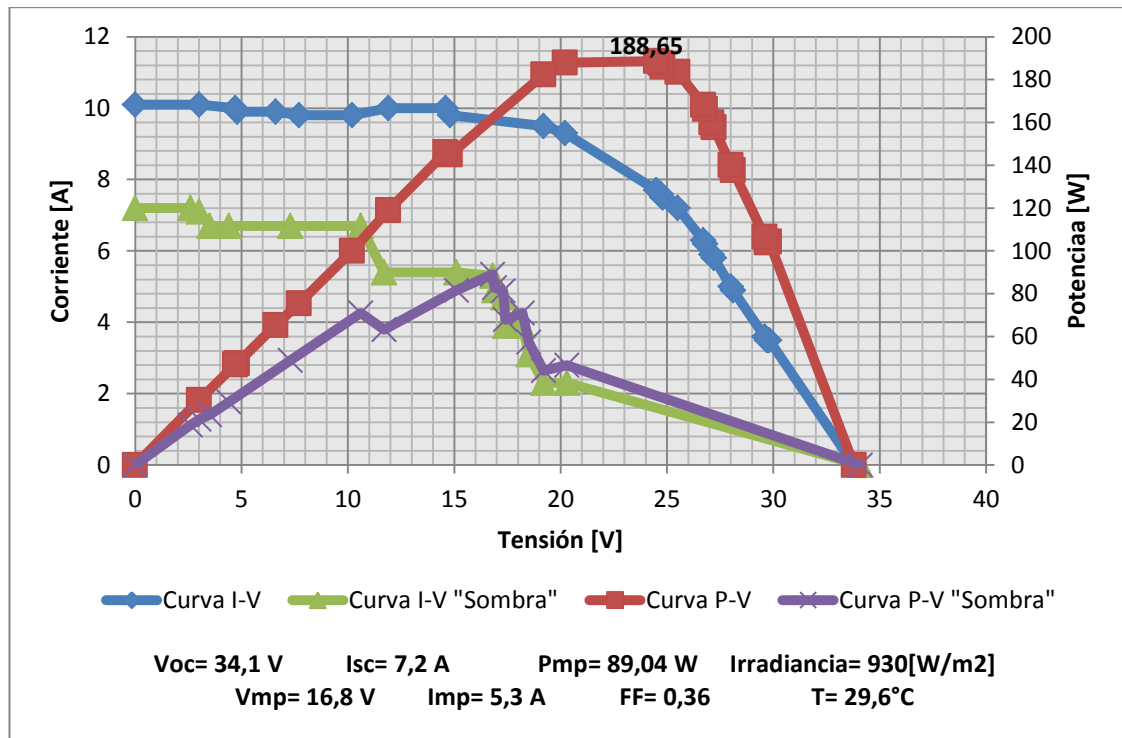
Para este caso se quiso simular un tipo de sombra que podría ocasionar una edificación cercana a la instalación fotovoltaica. Se utilizó nuevamente cartón posicionándolo a una distancia aproximada a 50 cm del panel, como se muestra a continuación.

Figura 40. Sombra producida por una edificación cercana



En la Figura 41 se visualiza como la corriente no logra alcanzar valores más elevados respecto al obtenido en la prueba sin sombra, por el contrario, empieza a disminuir paulatinamente el valor de esta a partir de los 4[V] alcanzando pérdidas de 52,8%.

Figura 41. Curvas características para sombra producida por una edificación cercana



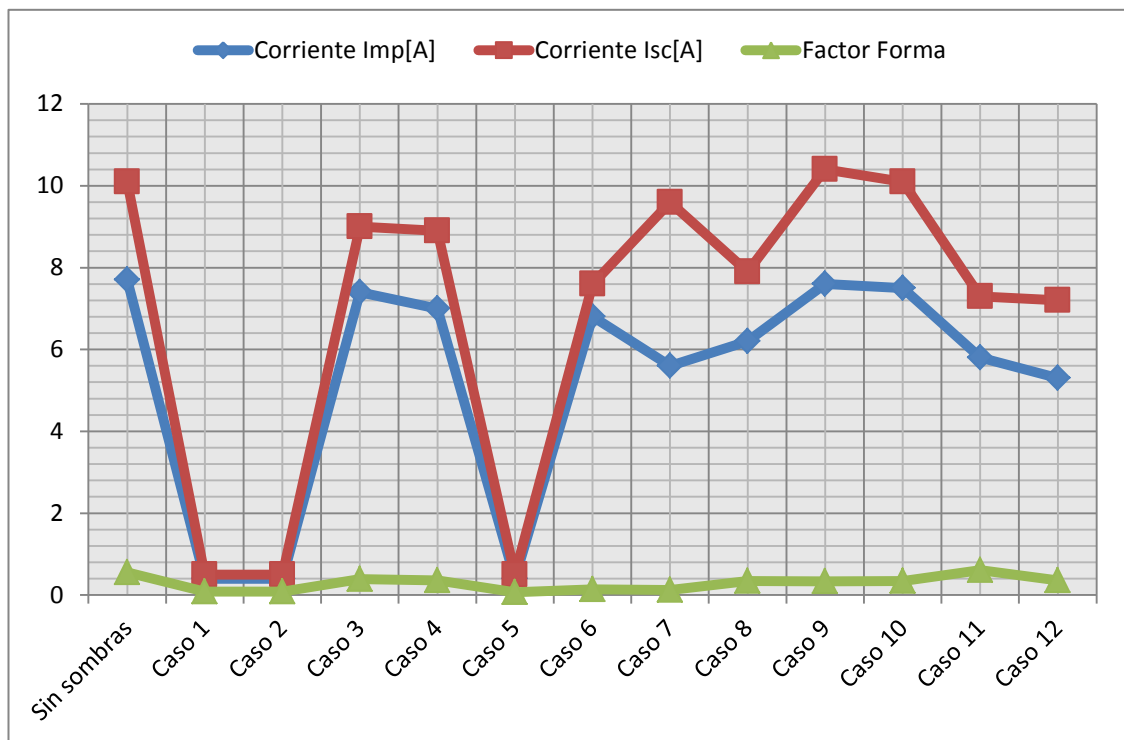
En cuanto al estudio anterior basado en los efectos producidos por diferentes tipos de sombra en un panel fotovoltaico, se planteó un resumen de los valores obtenidos para cada uno de los casos mencionados. Por tanto, la Tabla 21 presenta los valores de tensión de circuito abierto, corriente de corto circuito, máxima potencia, tensión en el punto de máxima potencia, corriente en el punto de máxima potencia, factor forma y porcentaje de pérdidas en relación a los valores obtenidos en la prueba sin sombra.

Tabla 21. Resumen de los valores obtenidos para un solo panel

	Tensión Voc [V]	Corriente Isc [A]	Potencia Pmp [W]	Tensión Vmp [V]	Corriente Imp [A]	Factor Forma FF	Pérdidas (%)
Sin sombras	33,8	10,1	188,65	24,5	7,7	0,55	-
Caso 1	33,2	0,5	1,32	3,3	0,4	0,08	99,3
Caso 2	33,6	0,5	1,36	3,4	0,4	0,08	99,3
Caso 3	32,3	9	115,44	15,4	7,4	0,39	38,8
Caso 4	33,6	8,9	107,8	15,4	7	0,36	42,9
Caso 5	32,3	0,5	1,08	2,7	0,4	0,07	99,4
Caso 6	34,7	7,6	36,04	5,3	6,8	0,14	80,9
Caso 7	33,4	9,6	38,64	6,9	5,6	0,12	79,5
Caso 8	34,1	7,9	90,52	14,6	6,2	0,34	52
Caso 9	34,4	10,4	120,15	13,5	7,6	0,33	36,3
Caso 10	34,2	10,1	116,25	15,5	7,5	0,34	38,4
Caso 11	34,5	7,3	153,12	26,4	5,8	0,61	18,8
Caso 12	34,1	7,2	89,04	16,8	5,3	0,36	52,8

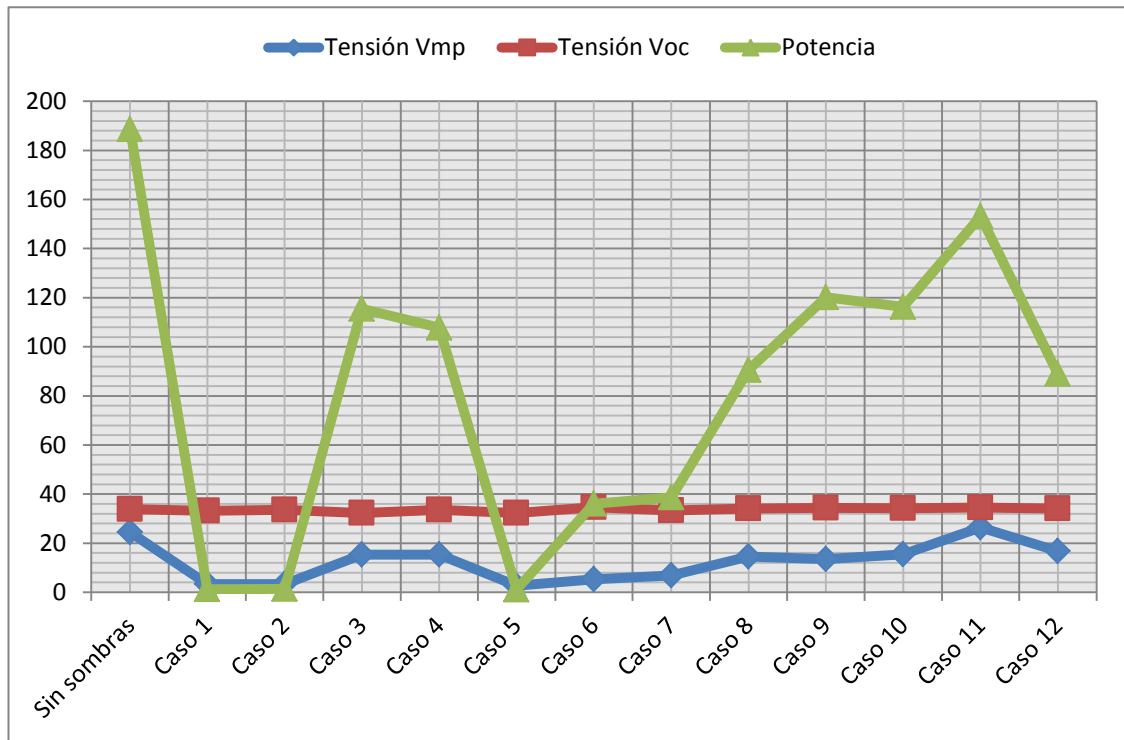
Por consiguiente extrayendo los resultados de los casos estudiados y comparando diversos parámetros con los valores obtenidos en ausencia de sombra, se presentan las siguientes figuras.

Figura 42. Comparativa de corrientes y factor forma para un solo panel



En la Figura 42 se contempla que la corriente en el punto de máxima potencia disminuye notablemente para los casos 1, 2 y 5, mientras que en los demás casos se mantienen más cercanos a los datos de la corriente de corto circuito.

Figura 43. Comparativa de tensiones y potencia para un solo panel



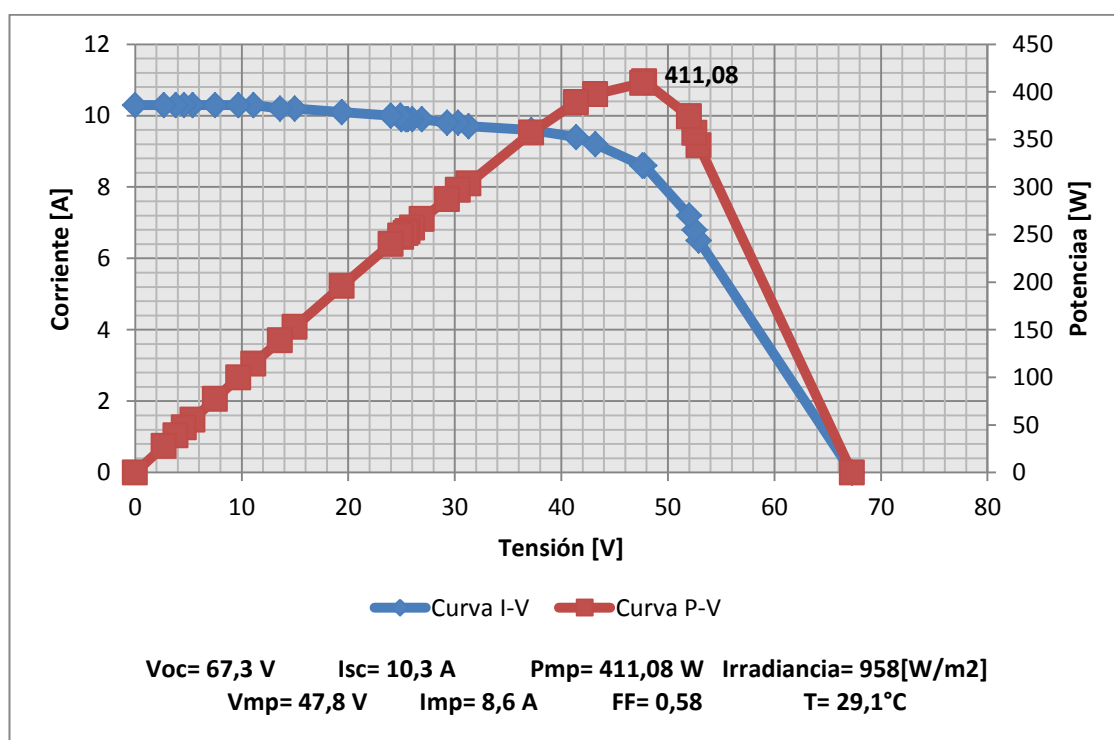
Se percibe en la Figura 43 que los datos de potencia obtenidos en cada caso, no llegan a estar tan cerca al valor arrojado cuando no se tienen sombras parciales. En cuanto a la tensión de circuito abierto los valores permanecen constantes, en cambio para la tensión en el punto de máxima potencia se tienen valores que oscilan con un promedio de 12,6[V].

Por otro lado, analizando de la Figura 17 a la Figura 41, se puede concluir que la presencia de sombras parciales en el panel fotovoltaico genera varios puntos máximos locales de potencia y un solo punto máximo global, tal como se ve en las diferentes curvas P-V.

7.2 ANÁLISIS DE SOMBRAS PARA DOS PANELES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS EN SERIE

En la Figura 44 se ilustran las curvas características I-V y P-V de dos paneles fotovoltaicos conectados en serie, en ausencia de sombras y con unas condiciones de irradiancia y temperatura de $958[\text{W}/\text{m}^2]$ y $29,1^\circ\text{C}$ respectivamente. La tensión de circuito abierto obtenida fue de $67,3[\text{V}]$, con una corriente de corto circuito de $10,3[\text{A}]$, máxima potencia de $411,08[\text{W}]$, tensión en el punto de máxima potencia de $47,8[\text{V}]$, corriente en el punto de máxima potencia de $8,6[\text{A}]$ y factor forma $0,58$.

Figura 44. Curvas características de dos paneles fotovoltaicos conectados en serie



A continuación se presentan diferentes casos de sombras que se llevaron a cabo al superponer cartón sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos conectados en serie. En cada uno de estos se encuentra una gráfica que contiene las curvas características I-V y P-V del caso en particular estudiado,

representadas en color verde y morado respectivamente. Además, se incluyen las curvas que se tienen de la Figura 44, las cuales actúan como referencia.

- **Caso 1. Sombra horizontal en la primera fila en un solo panel**

Como se puede observar en la Figura 45 la sombra en este caso se presenta sobre la primera fila de celdas que hacen parte del primer panel.

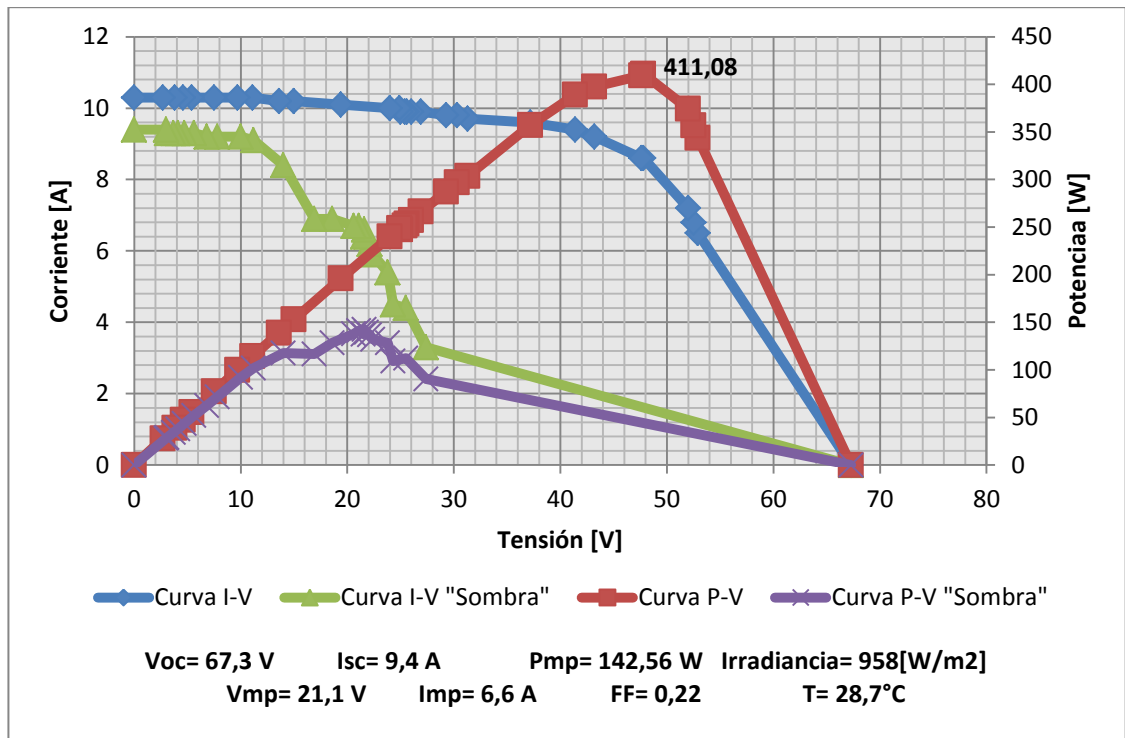
Figura 45. Sombra horizontal en la primera fila para un solo panel



Al observar la Figura 46 se puede presenciar la importante diferencia que existe para tensiones bajas. Este resultado es acorde a lo esperado, teniendo en cuenta que uno de los paneles está libre de sombras, entregando valores de corriente que provienen de un comportamiento normal. De igual manera se producen pérdidas de 65,3%.

Tal como se observa en la curva P-V de la Figura 46 se presentan 2 máximos locales (1 solo máximo global) debido a las sombras parciales.

Figura 46. Curvas características para sombra en la primera fila en un solo panel



- **Caso 2. Quinta fila de celdas con sombra en un solo panel**

Para esta prueba se tuvo un caso muy parecido al anterior, pero en vez de tapar la primera fila de celdas del primer panel, se realizó sobre la quinta fila de celdas del segundo como se muestra a continuación.

Figura 47. Sombra en la quinta fila en un solo panel

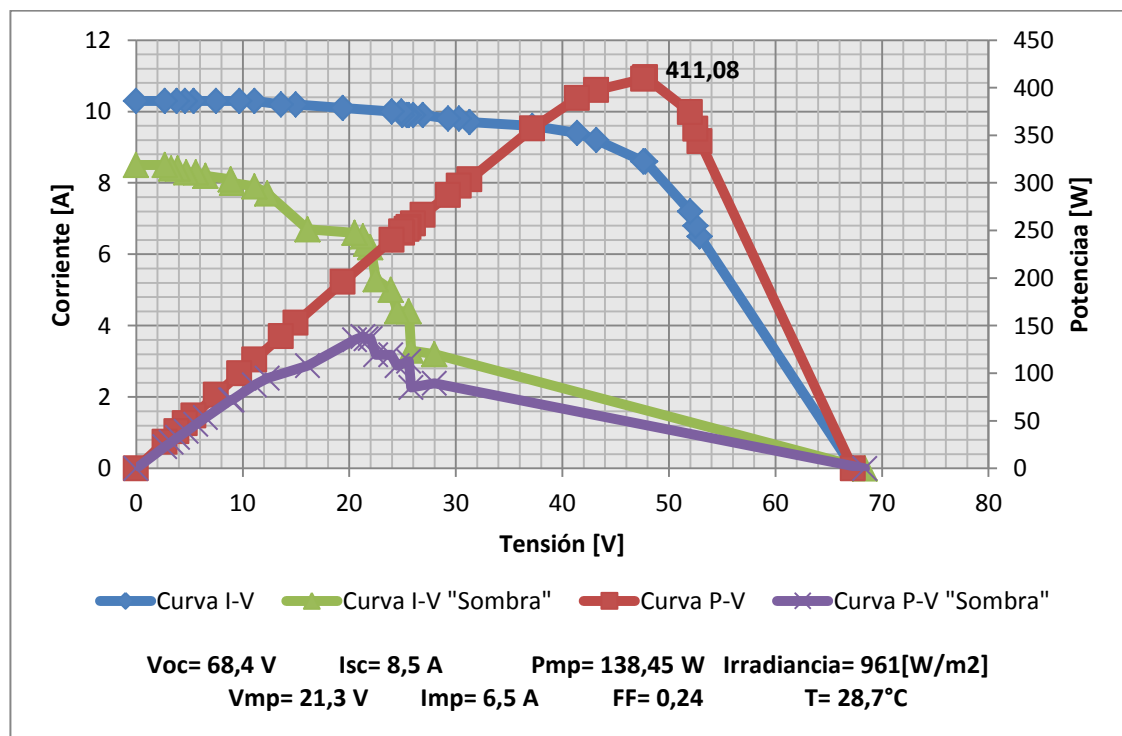


Para este caso igual que en el anterior, el tener una sombra horizontal cuando los paneles están puestos verticalmente, representa una incidencia directa sobre todas sus cadenas de celdas, repercutiendo de esta manera en una considerable disminución de la corriente producida (ver Figura 48), al punto de producirse pérdidas de 66,3%.

Así mismo se observa que no existe una diferencia notoria en cuanto a que la sombra horizontal se presente en la primera o quinta fila del primer o segundo panel respectivamente, teniendo sentido ya que en ambos casos se cubre la misma cantidad de celdas en cada cadena.

Además resulta ser un comportamiento esperado si se tienen en cuenta los dos primeros casos estudiados en el literal anterior, siendo más específicos, para cuando se trataba del análisis de un solo panel en particular.

Figura 48. Curvas características para sombra en la quinta fila en un solo panel



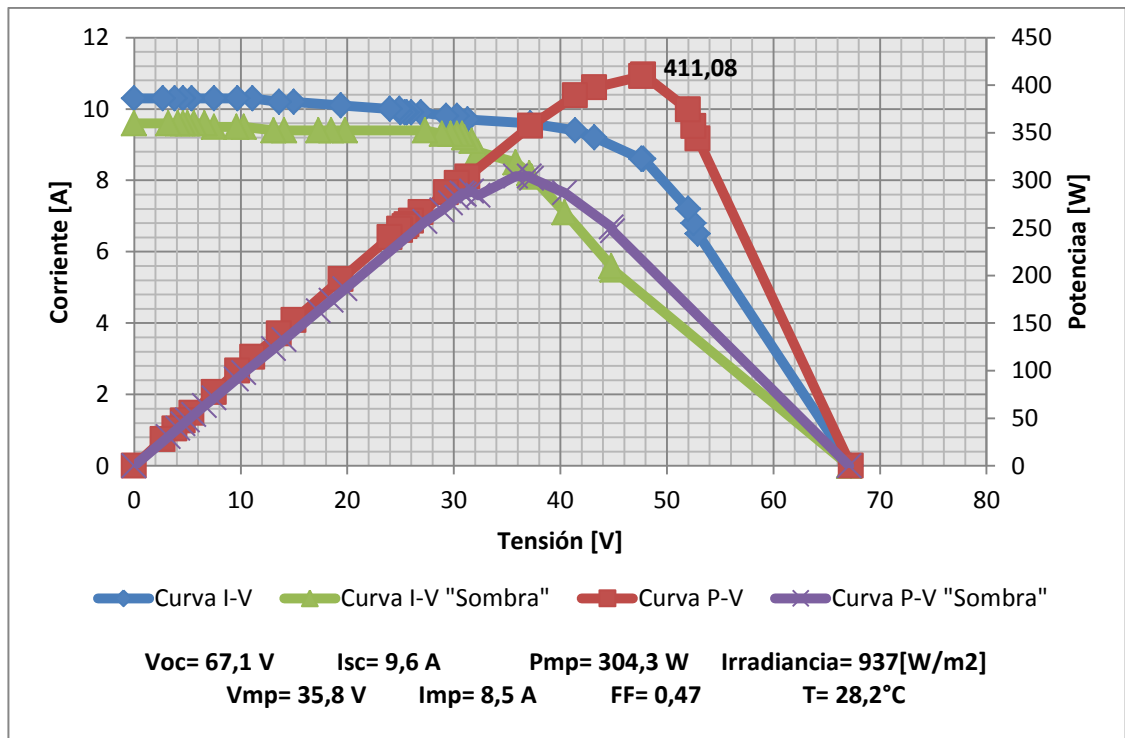
- **Caso 3. Primera columna vertical de celdas con sombra en un solo panel**

En este caso el sombreado consistió en tapar toda la primera columna de celdas perteneciente al primer panel, como se aprecia en la Figura 49.

Figura 49. Sombra en la primera columna para un solo panel



Figura 50. Curvas características para sombra en la primera columna en un solo panel

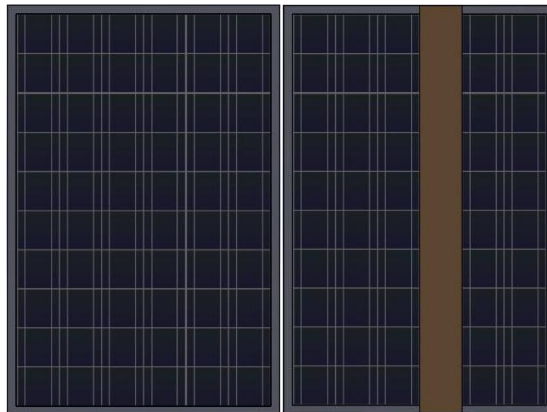


Teniendo en cuenta las conexiones internas de los paneles, se puede inferir que esta sombra solo repercute en una de las 6 cadenas de celdas que se tienen en total, notándose en la Figura 50, como la corriente se ve mermada de forma notoria a partir de que se alcanzan los 30[V]. Las pérdidas en este caso representan 26%, incluso cuando se logran valores elevados de corriente.

- **Caso 4. Cuarta columna de celdas con sombra en un solo panel**

Como se puede observar en la Figura 51 en este caso se tiene una sombra similar a la del caso anterior, tapándose de esta manera toda la cuarta columna del segundo panel.

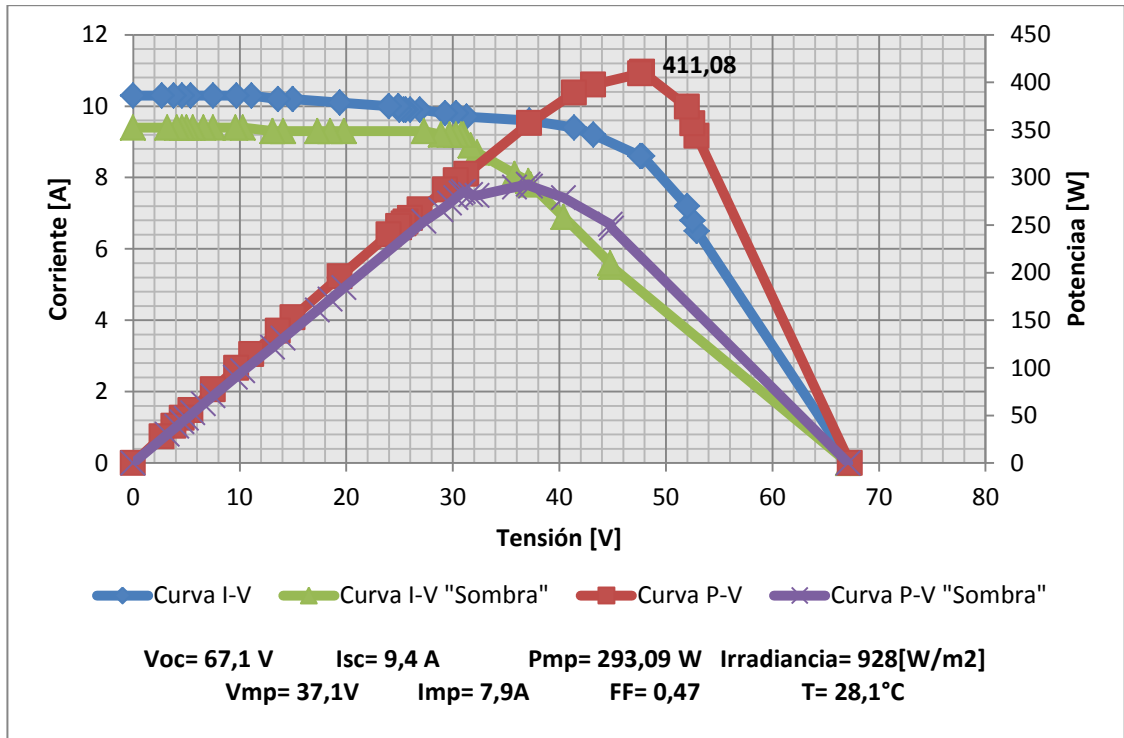
Figura 51. Sombra en la cuarta columna para un solo panel



Los resultados que se tienen de la Figura 52 resultan ser bastante semejantes a los obtenidos en el caso 3, siendo algo esperado teniendo en cuenta que la sombra repercute directamente sobre una sola de las 6 cadenas de celdas y en igual proporción al caso anterior, obteniéndose valores de corriente disminuidos parcialmente a partir de los 30[V] arrojando pérdidas de 28,7%

De igual manera que en los casos 1 y 2 para los casos 3 y 4 no se presenta gran diferencia al poner la sombra sobre alguna columna de celdas específica del primer o segundo panel.

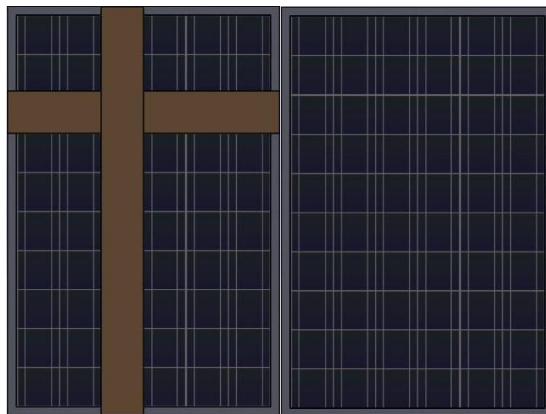
Figura 52. Curvas características para sombra en la cuarta columna en un solo panel



- **Caso 5. Tercera fila y tercera columna de celdas con sombra en un solo panel**

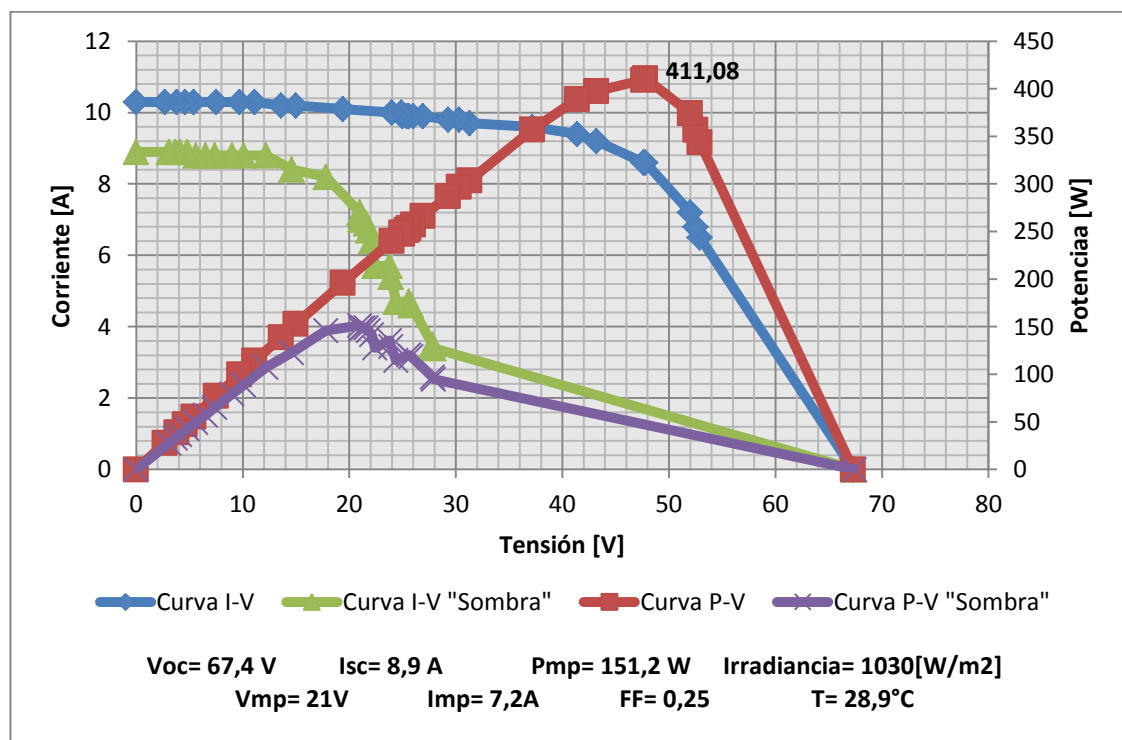
En este caso se acomodo una sombra semejante a una cruz, tapandose la fila y columna número tres del primer panel fotovoltaico, tal como se expone en la siguiente figura.

Figura 53. Sombra en la tercera fila y columna para un solo panel



Los resultados de esta prueba se pueden ver en la Figura 54, donde se evidencia la disminución que acontece de forma directa en el valor de corriente a partir de que se alcanzan los 15[V], debido a la forma en que es tipo de sombra repercute en todas las cadenas de celdas de un mismo panel, presentándose en general una mayor proporción de sombras y unas pérdidas de 63,2%.

Figura 54. Curvas características para sombra en la tercera fila y columna en un solo panel



- **Caso 6. Sombra diagonal en un solo panel**

Para este caso se aplicó una sombra en diagonal como la observada en la Figura 55, incidiendo sobre distintas celdas de dos cadenas del segundo panel.

Figura 55. Sombra en diagonal para un solo panel

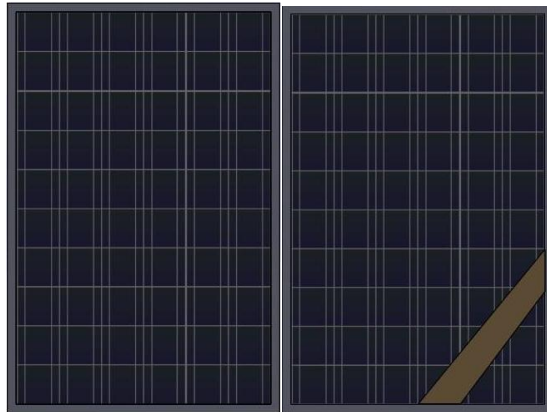
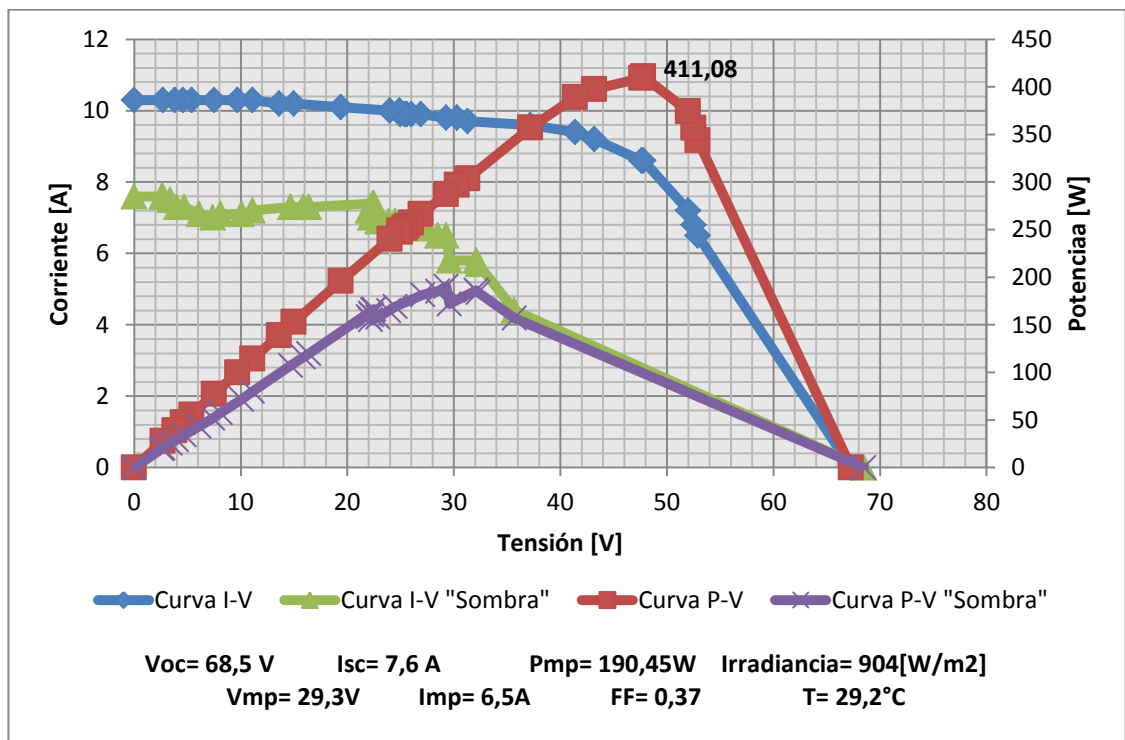


Figura 56. Curvas características con sombra en diagonal en un solo panel



En la Figura 56 se puede visualizar la forma en la que la corriente generada aumenta de manera consistente hasta llegar al valor de 7,6[A], pero aún se queda distante a los valores obtenidos en ausencia de sombras, dejando en evidencia los efectos de este tipo de sombreado, que aunque repercute en varias celdas a las vez, no incide de manera completa sobre cada celda. Las pérdidas en este caso son de 53,7%.

- **Caso 7. Tres celdas horizontales en la última fila con sombra en un solo panel**

En este caso se puso un sombreado como el que se muestra en la Figura 57, consistiendo en tapar tres celdas de la última fila del primer panel fotovoltaico.

Figura 57. Sombra en tres celdas horizontales para un solo panel

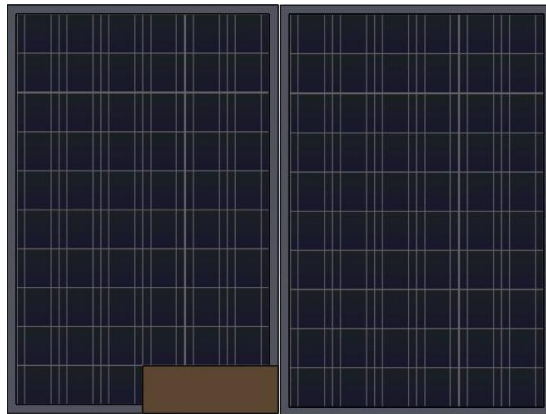
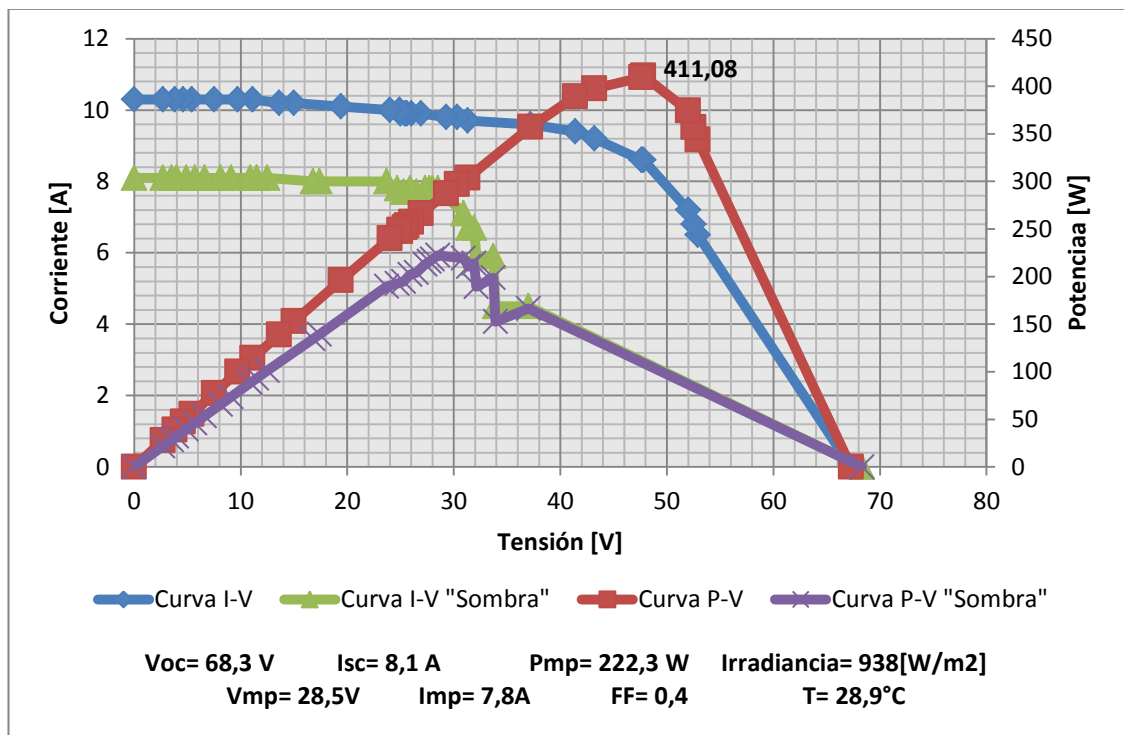


Figura 58. Curvas características con sombra en tres celdas horizontales en un solo panel

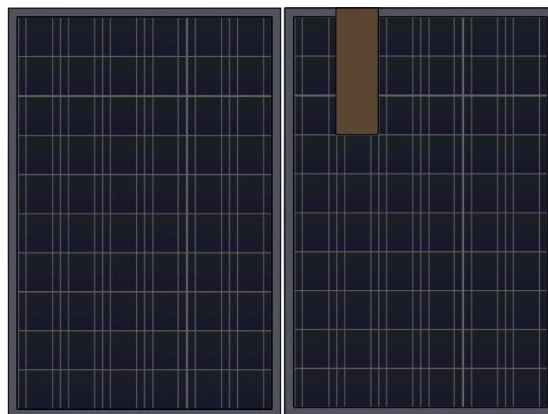


La Figura 58 permite observar los resultados obtenidos para esta prueba, presentándose un comportamiento semejante al del caso anterior, evidenciándose nuevamente como influye el sombreado sobre dos de las cadenas de celdas del primer panel, ocasionando un crecimiento paulatino en el valor de la corriente hasta alcanzar los 8,1[A] arrojando pérdidas de 45,9%.

- **Caso 8. Tres celdas verticales en la segunda columna con sombra en un solo panel**

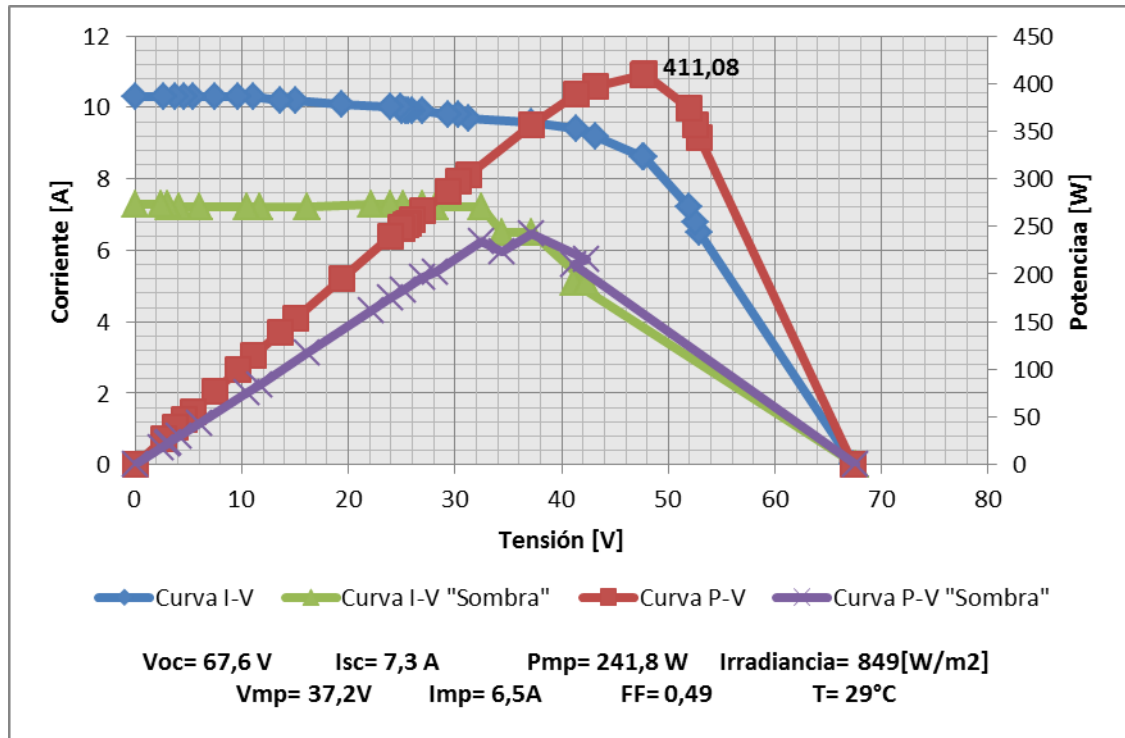
En la Figura 59 se exhibe la forma en que se dispuso la sombra para esta prueba, consistiendo en tapar tres celdas en serie de la segunda columna del segundo panel.

Figura 59. Sombra en tres celdas verticales para un solo panel



En la Figura 60 se puede visualizar el efecto producido por el sombreado de tres celdas en serie de una misma cadena, generando un aumento escalonado en el valor de la corriente, hasta llegar a conseguir solo 7,3[A] en comparación a lo visto en ausencia de sombras. Las pérdidas en este caso son de 41,2%.

Figura 60. Curvas características con sombra en tres celdas verticales en un solo panel



- **Caso 9. Una sola celda en una esquina con sombra en un solo panel**

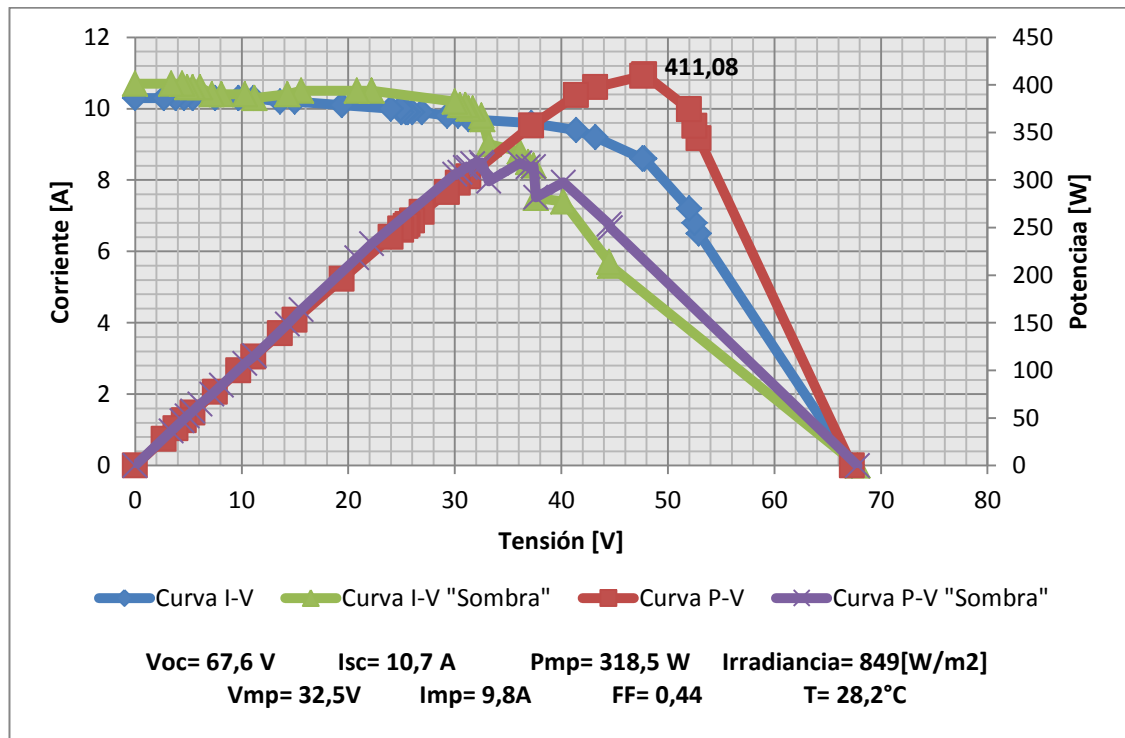
Se estableció una sombra sobre una sola celda en una de las esquinas del primer panel. La Figura 61 presenta un bosquejo del tipo de sombra.

Figura 61. Sombra en una esquina para un panel



Por medio de la Figura 62 se puede tener un estimado del efecto que produce una sombra que podría ser considerada como despreciable por muchos. Se aprecia como la corriente logra alcanzar valores elevados durante los primeros 30[V], luego disminuye escalonadamente y termina produciendo pérdidas de 22,5%.

Figura 62. Curvas características con sombra en una esquina en un solo panel



- **Caso 10. Una sola celda en el medio con sombra en un solo panel**

La sombra empleada en este caso, consistió en tapar una sola celda ubicada en lo más central posible del segundo panel. Un esbozo de esto se tiene en la Figura 63.

Figura 63. Sombra en una celda en la mitad de un panel

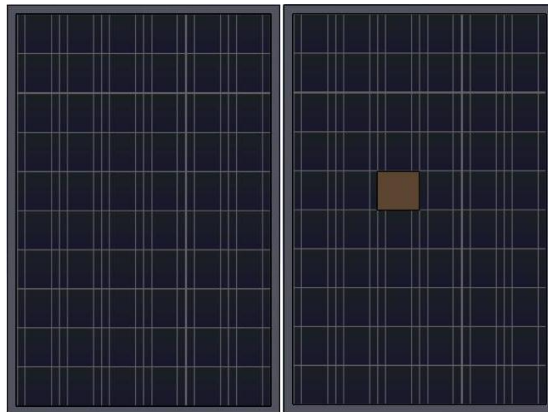
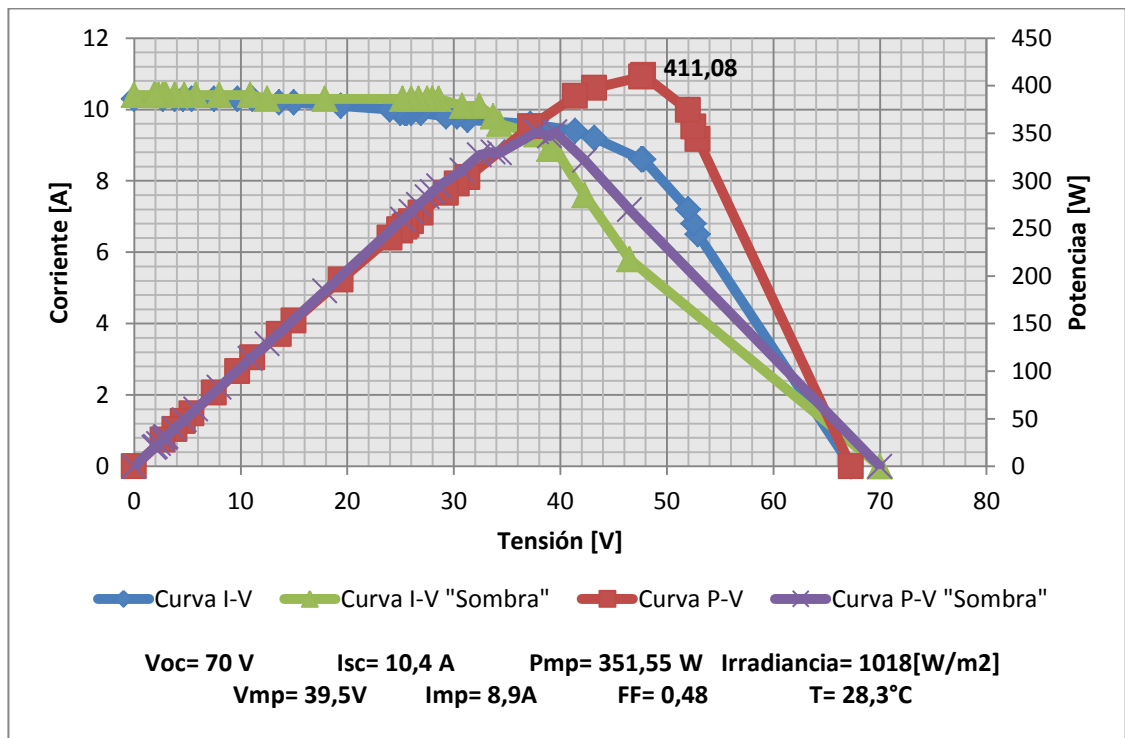


Figura 64. Curvas características con sombra en una celda en la mitad de un panel



Los resultados arrojados en la Figura 64 resultan en este caso esperados, teniendo en cuenta el comportamiento que se presentó en el apartado anterior. Se visualiza como la corriente logra obtener valores elevados durante los primeros 30[V], luego decrece de manera escalonada y finaliza arrojando pérdidas de 14,5%.

- **Caso 11. Sombra con hojas de árboles en un solo panel**

Para este caso se estableció generar sombras con tres hojas sobre la superficie de un mismo panel, siendo en esta oportunidad el primero. La Figura 65 exhibe una idea de ello.

Figura 65. Sombra con hojas de árboles en un panel

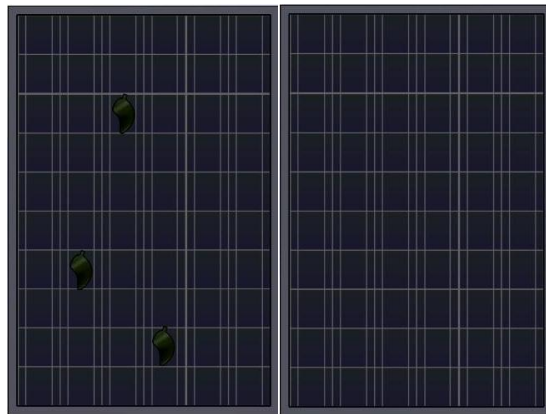
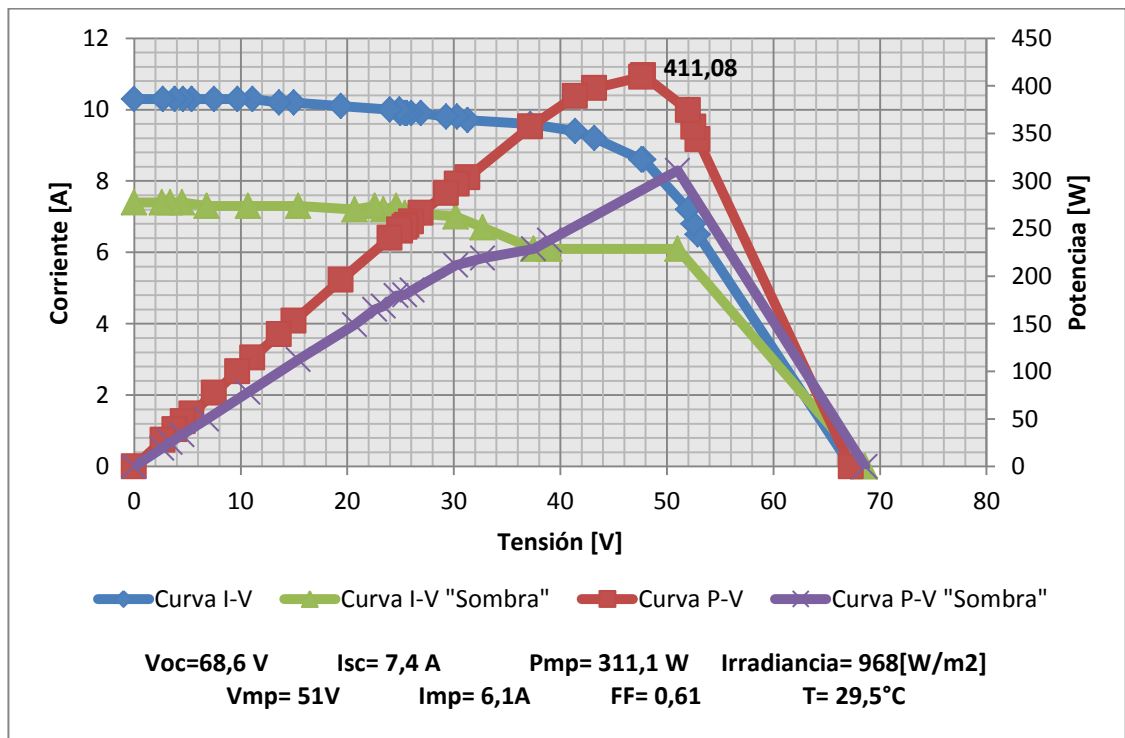


Figura 66. Curvas características con sombra de hojas de árboles en un panel

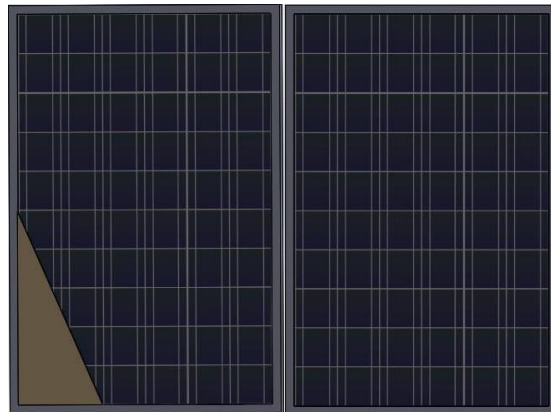


La Figura 66 muestra los resultados que se obtuvieron al realizar esta prueba de sombra, en donde se aprecia la incidencia que se tiene en general con cada cadena de celdas sombreada, disminuyendo en cierta proporción la corriente alcanzada. Cada una de estas hojas cubría en promedio un 40% del tamaño de cada celda sobre la que posaba, alcanzándose unas pérdidas de 24,3%.

- **Caso 12. Sombra producida por una edificación cercana en un solo panel**

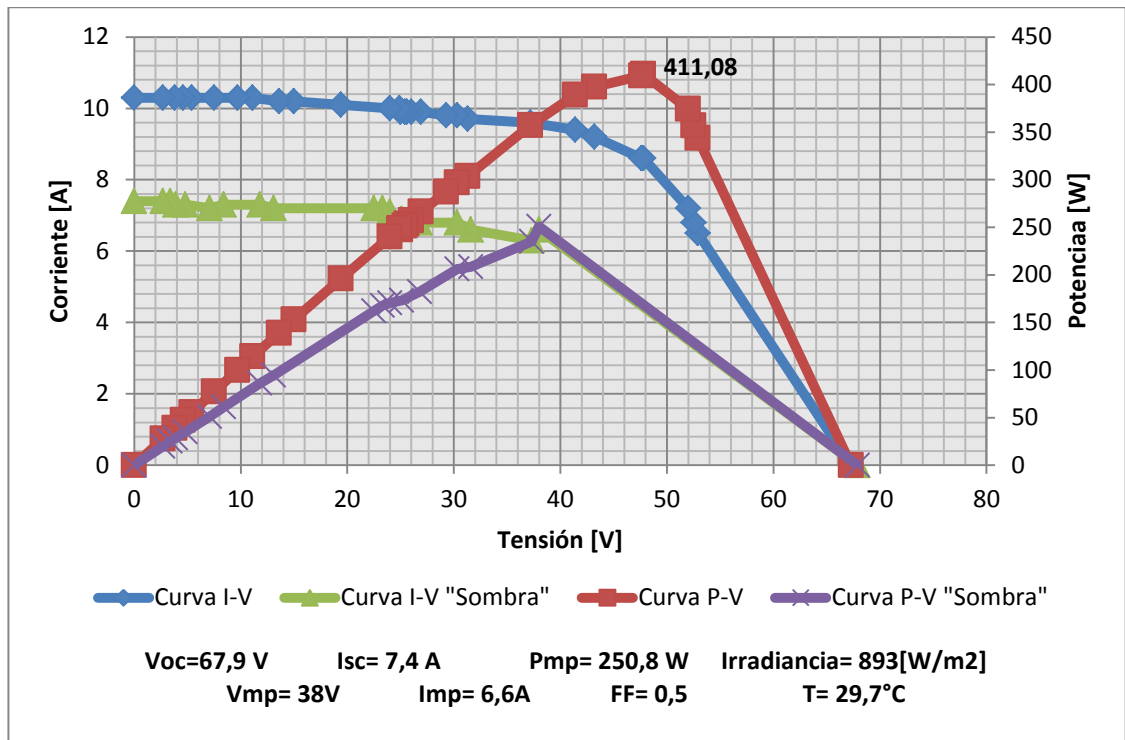
En esta ocasión se quiso simular un tipo de sombra que podría ocasionar una edificación cercana a la instalación fotovoltaica. Se utilizó nuevamente cartón posicionándolo a una distancia aproximada a 50 cm del panel. La Figura 67 plasma una idea de ello.

Figura 67. Sombra producida por una edificación cercana en un panel



En la Figura 68 se visualiza como la corriente no logra alcanzar valores más elevados respecto al obtenido en la prueba sin sombra, destacándose en esta oportunidad la falta de producción debido a la ausencia de una de las cadenas de celdas pertenecientes al panel secundario. Las pérdidas determinadas en este caso son de 39%.

Figura 68. Curvas características con sombra producida por una edificación cercana en un panel



En cuanto al estudio anterior basado en los efectos producidos por diferentes tipos de sombra en dos paneles fotovoltaicos conectados en serie, se planteó un resumen de los valores obtenidos para cada uno de los casos mencionados. Por tanto, la Tabla 22 presenta los valores de tensión de circuito abierto, corriente de corto circuito, máxima potencia, tensión en el punto de máxima potencia, corriente en el punto de máxima potencia, factor forma y porcentaje de pérdidas en relación a los valores obtenidos en la prueba sin sombra.

Tabla 22. Resumen de los valores obtenidos para dos paneles conectados en serie

	Tensión Voc [V]	Corriente Isc [A]	Potencia Pmp [W]	Tensión Vmp [V]	Corriente Imp [A]	Factor Forma FF	Pérdidas (%)
Sin sombras	67,3	10,3	411,08	47,8	8,6	0,58	-
Caso 1	67,3	9,4	142,56	21,1	6,6	0,22	65,3
Caso 2	68,4	8,5	138,45	21,3	6,5	0,24	66,3
Caso 3	67,1	9,6	304,3	35,8	8,5	0,47	26
Caso 4	67,1	9,4	293,09	37,1	7,9	0,47	28,7
Caso 5	67,4	8,9	151,2	21	7,2	0,25	63,2
Caso 6	68,5	7,6	190,45	29,3	6,5	0,37	53,7
Caso 7	68,3	8,1	222,3	28,5	7,8	0,4	45,9
Caso 8	67,6	7,3	241,8	37,2	6,5	0,49	41,2
Caso 9	67,6	10,7	318,5	32,5	9,8	0,44	22,5
Caso 10	70	10,4	351,55	39,5	8,9	0,49	14,5
Caso 11	68,6	7,4	311,1	51	6,1	0,61	24,3
Caso 12	67,9	7,4	250,8	38	6,6	0,5	39

En consecuencia al extraer los resultados de los casos estudiados y comparando diversos parámetros con los valores obtenidos en ausencia de sombra, se contemplan las siguientes figuras.

Se divisa en la Figura 70 que los datos de potencia obtenidos en cada caso, no llegan a estar tan cerca al valor arrojado cuando no se tiene sombra. En cuanto a la tensión de circuito abierto los valores permanecen constantes, en cambio para la tensión en el punto de máxima potencia se tienen valores que oscilan en un promedio de 33,85[V].

En la Figura 69 se percibe que los valores de la corriente en el punto de máxima potencia se mantienen cercanos a los datos de la corriente de corto circuito.

Figura 69. Comparativa de corrientes y factor forma para dos paneles conectados en serie

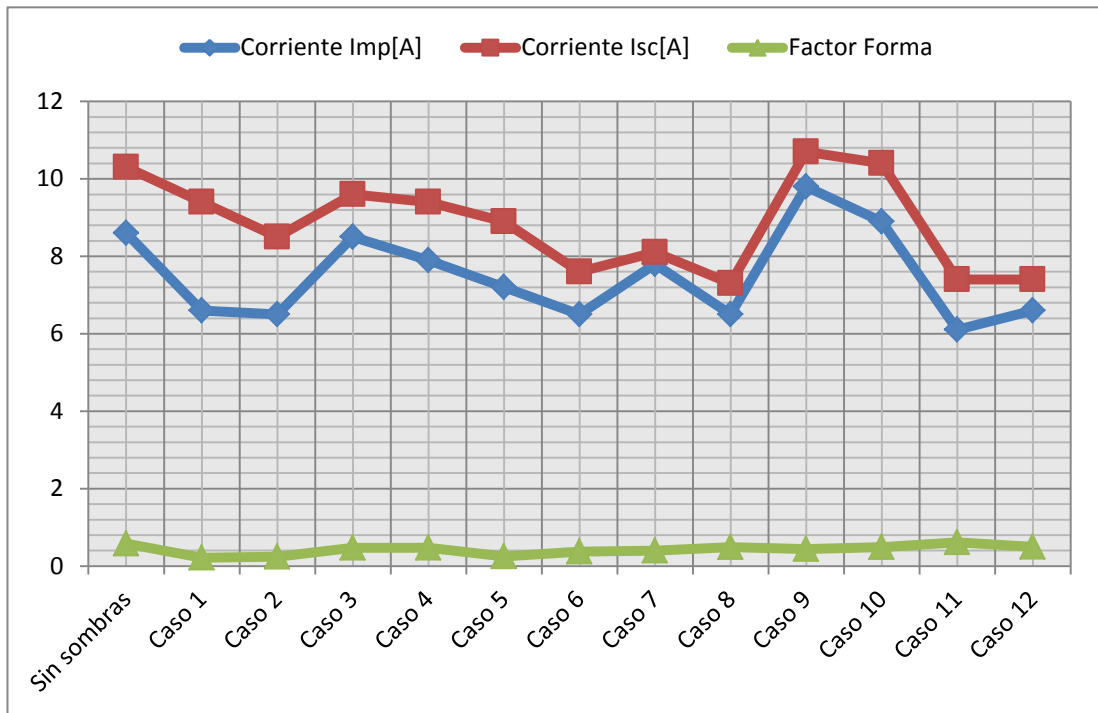
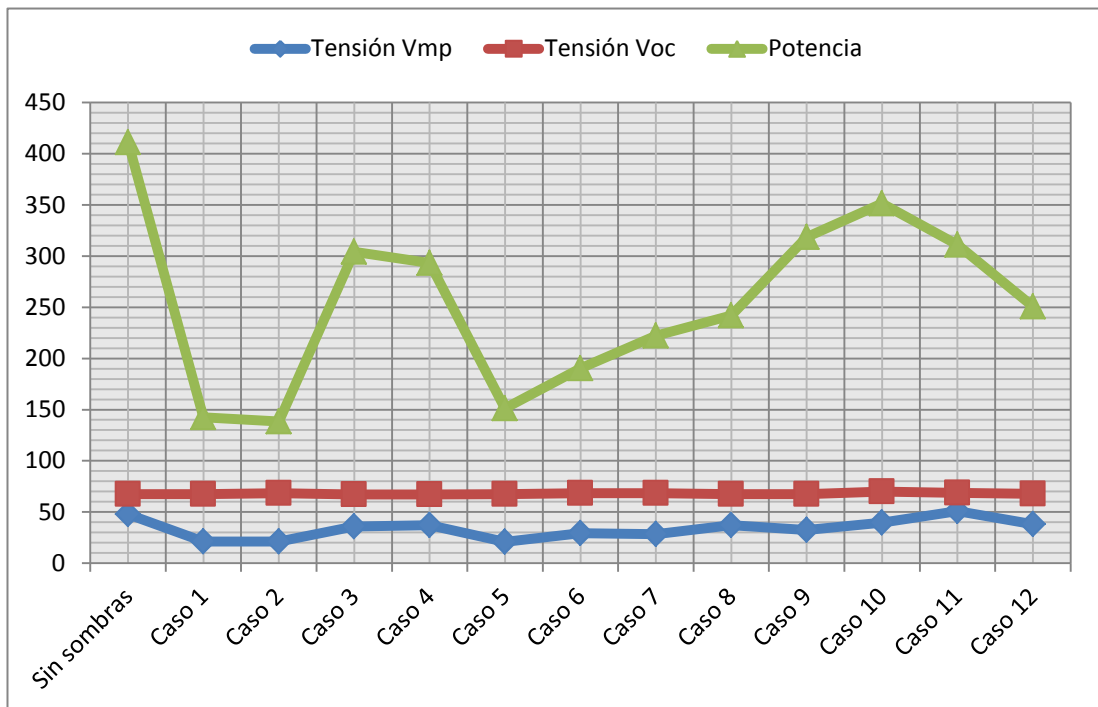


Figura 70. Comparativa de tensiones y potencia para dos paneles conectados en serie



8. CONCLUSIONES

La investigación desarrollada en el presente trabajo de grado se llevó a cabo con el fin de establecer los efectos que se presentan en las curvas características I-V y P-V de paneles solares fotovoltaicos según la inclinación, orientación y presencia de sombras. En base a las observaciones realizadas, se cumplieron ciertos aspectos:

Se diseñó un soporte para paneles solares fotovoltaicos enfocado hacia dos factores fundamentales, inclinación y direccionamiento, logrados a través de unos mecanismos sencillos y fáciles de integrar, ya que la estructura cumple con unas funciones técnico mecánicas óptimas. El diseño está calculado teniendo en cuenta la fuerza mecánica que ejercen factores o condiciones físicas del ambiente y su manipulación. Para lograrlo se escogió una estructura metálica, por su facilidad de ensamble, corte y soldado, haciéndolo a la vez más resistente y seguro. Siguiendo el procedimiento propuesto se puede garantizar así la seguridad del sistema, su buen funcionamiento y la seguridad del entorno.

Se logró ejecutar la instalación de los dos primeros paneles solares previstos, además al finalizar se agregaron dos paneles más al montaje, consiguiéndose una instalación con una potencia cercana a los 1000[W]. Esta construcción se originó en una parte de la terraza perteneciente al Edificio de Investigaciones, situado en el Parque Tecnológico Guatiguará. Las conexiones eléctricas de estos paneles solares se fijaron dentro del laboratorio de Integración Energética, acoplados en un tablero de control.

Para el análisis de la información generada en el módulo fotovoltaico, se elaboró un estudio de dos meses basado en la lectura de las curvas características I-V y P-V. Durante este tiempo, se hicieron diferentes tipos de combinaciones, en relación a la inclinación y orientación fijadas para el panel. Se sintetizaron todos estos datos y se secciono por hora los

resultados arrojados, con el propósito de ser más específicos al determinar los parámetros más óptimos para cada hora del día. El resultado obtenido a causa de esto, permite indicar que al posicionar de una manera fija una instalación fotovoltaica en una inclinación de 10° y con una orientación comprendida en un rango entre $315^\circ - 45^\circ$ en sentido horario, se podrán conseguir resultados más eficientes generalizados durante el día.

Se determinó el efecto producido en la curva I-V debido a factores externos, influenciado por diferentes tipos de sombras en pruebas de campo realizadas. Como resultado general, se vio que el sombreado parcial produce una disminución de la irradiancia o densidad de potencia incidente sobre el panel o celda solar, lo que va a provocar una disminución de la corriente de cortocircuito en relación al tipo de sombreado que se presente, por tanto se producirá una modificación en la curva I-V de manera que el sistema no funcionará como lo indica el fabricante, produciendo una disminución de potencia y además una variación del punto de trabajo en cuanto al seguimiento del punto de máxima potencia.

Según se observó en las diferentes figuras obtenidas al realizar el análisis de las curvas características del arreglo fotovoltaico bajo sombras parciales, se presentan varios puntos máximos locales de potencia y un solo punto máximo global. De esta manera se recomienda que lo anterior sea considerado en las aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos donde se busque la generación de la máxima potencia en los paneles por medio de algoritmos de seguimiento (MPPT, Maximum Power Point Tracking), ya que éstos algoritmos (principalmente los algoritmos tradicionales) podrían caer en puntos máximos locales, lo que llevaría a un menor aprovechamiento de la energía.

9. RECOMENDACIONES

Se podría mejorar la precisión respecto al método de adquisición de datos, empleando sistemas de medición combinado como lo son el TRI-SEN y TRI-KA. Donde el TRI-SEN actúa como sensor de irradiancia y temperatura de las celdas y el TRI-KA registra la curva I-V a partir de la obtención de los valores de corriente de cortocircuito y tensión de circuito abierto.

Resultaría favorable aprovechar la reciente instalación de cuatro (4) paneles fotovoltaicos que se llevó a cabo en el Parque Tecnológico Guatiguará, para realizar próximos estudios de investigación y tal vez realizar nuevas pruebas sobre pérdidas, pero en otra época del año y de esta manera comparar resultados, teniendo en cuenta que ahora se tienen aproximadamente 1000[W] para usar.

Se sugiere jornadas de limpieza para los paneles fotovoltaicos, ya que deben estar limpios para poder ofrecer un 100% de productividad. Si presentan incrustaciones, polvo, excrementos de pájaros, polen, etc., da como resultado una importante pérdida de producción que se ve reflejado directamente en la toma de resultados.

El diseño inicial para la estructura que soportaría los paneles fotovoltaicos en el Parque Tecnológico Guatiguará, no se llevó a cabo por cuestiones de sobrecostos. Mas sin embargo, queda a disposición de ser utilizado como proyecto y abierto a posibles cambios con el fin de que sea más viable su implementación.

BIBLIOGRAFÍA

AGUILERA NIEVES. Antonio. Montaje mecánico en instalaciones solares fotovoltaicas. 1ª edición. Málaga-España. Editorial Vértice. 2011.

COTA Alma, FOSTER, Robert y GHASSEMI, Majid. Solar Energy: Renewable Energy and the Environment. Florida-USA. CRC Press. 2010.

FERNANDEZ BARRERA, Manuel. Energía Solar: Electricidad Fotovoltaica. Madrid. Liberfactory. 2010.

LYNN. Paul A. Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics. United Kingdom. Wiley. 2010.

MENDEZ MUÑIZ, Javier María. CUERVO GARCIA, Rafael. Energía Solar Fotovoltaica. 2ª Edición. Madrid. Fundación Confemental. 2007.


MUJAL ROSAS, Ramón M. Tecnología eléctrica. Barcelona: Edicions UPC, 2000.

SANCHEZ MAZA. Miguel Ángel. Energía Solar Fotovoltaica. México. Limusa. 2008.

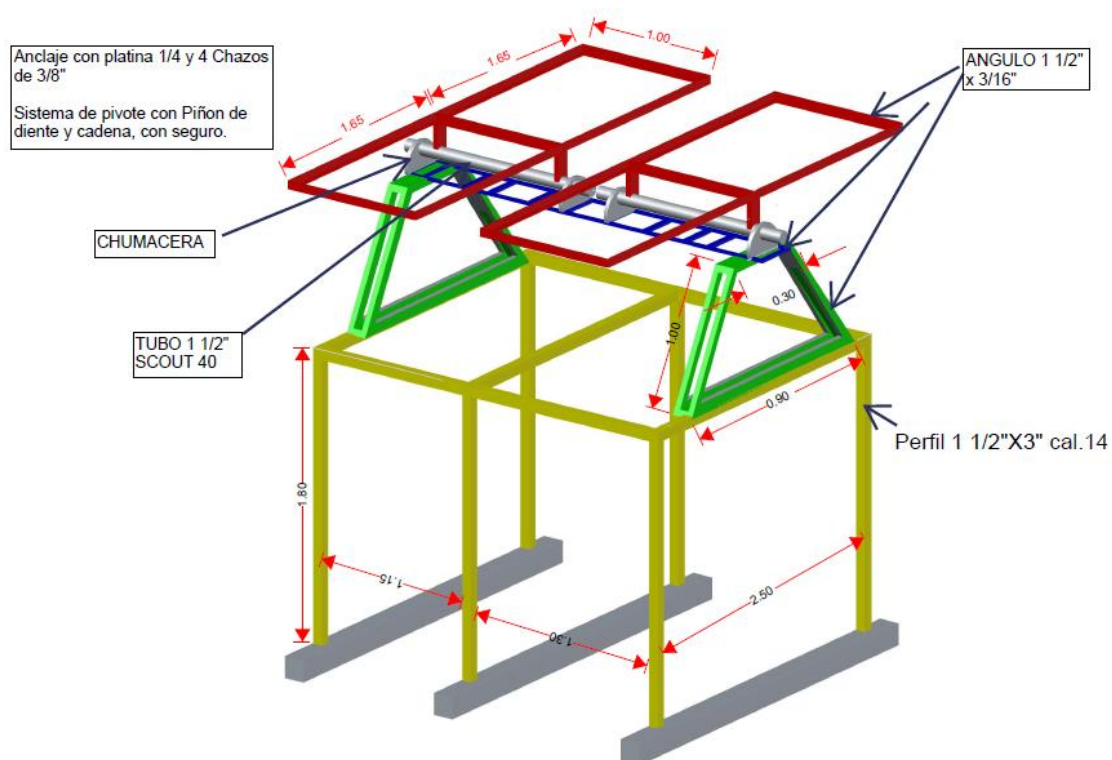
ANEXOS

Anexo A. Características del panel fotovoltaico SP50M

Model: SP50M	
Rated Maximum Power(Pm)	50W
Tolerance	± 5%
Voltage at Pmax(Vmp)	18.30V
Current at Pmax(Imp)	2.73A
Open-Circuit Voltage(Voc)	22.03V
Short-Circuit current(Isc)	2.92A
Maximum System Voltage	1000VDC
Maximum Series Fuse Rating	12A
Operation Temperature	-40°C to +85°C
Application Class	Class A
Weight(kg)	Mono-Si
Dimension(mm)	845*545*35



 **Warning**
Solar modules generate electricity as soon as they are exposed to light. One module on its own is below the safety extra low volt level, but multiple modules connected in series (summing the voltage) represent a danger.
All technical data at standard test condition
AM=1.5 E=1000W/m TC=25°C

Anexo B. Perspectiva Estructural de los paneles solares instalados en el Parque Tecnológico Guatiguará



Fuente: Empresa contratista EDECS S.A.S.

Anexo C. Características del panel fotovoltaico UP-M250P











Poly Series
6" PV Module 60 cells

6" Polycrystalline PV module 60 cells

Key features

- 👍 High Quality Bill of Materials
- 🔒 Reinforced Module Warranty
- 🏠 Universal design (residential, commercial, ground mounted)
- 💰 Best seller for its performance/price ratio










Secure Investment

Upsolar provides industry-leading product coverage for all our modules to ensure our customers achieve superior long-term value from their solar installations. In addition to a 10-year product warranty, which covers unanticipated module damage, Upsolar implements a 25-year performance guarantee known as the Reinforced Module Warranty.

Whereas traditional warranties offer only two trigger points over 25 years, the Reinforced Module Warranty features six trigger points at years 3, 7, 12, 16, 20 and 25. Upsolar also maintains relationships with third-party insurance providers to offer an additional layer of protection for interested parties.

Product guarantee for 10 years Performance guarantee for 25 years



NOTE:

- STC: Irradiance 1000 W/m², Module temperature 25°C, AM=1.5
- Nominal Operating Cell Temperature below data is only for reference
- Deviation of V_m (V), I_m (A), V_{oc} (V) and I_{sc} (A) of ±10%

Electrical Characteristics

MODEL	UP-M235P	UP-M240P	UP-M245P	UP-M250P	UP-M255P
Max Power P _m (Wp)	235	240	245	250	255
Max Power Voltage V _m (V)	30.0	30.2	30.4	30.6	30.8
Max Power Current I _m (A)	7.84	7.95	8.06	8.17	8.30
Open-Circuit Voltage V _{oc} (V)	37.4	37.6	37.8	38.0	38.2
Short-Circuit Current I _{sc} (A)	8.25	8.40	8.45	8.50	8.55
Module Efficiency	14.4%	14.8%	15.1%	15.4%	15.7%
Maximum System Voltage (V)	1000(IEC)600(UL)				
Power Tolerance	±3%				
Series Fuse Rating (A)	20				

Components & Mechanical Data

Front Glass	High Transparency Tempered Glass 0.125" / 3.2 mm
Junction Box	IP 65 or above
Bypass Diode	3 diodes
Output Cables	1.0 m / IEC, UL approved (4 mm ² , 12AWG) (PV Wire Type)
Connectors	MCA F167, IEC and UL approved
Frame	Anodized aluminium alloy type 6063-T5
Encapsulation Material	EVA (0.105" / 0.45 mm ± 0.001" / 0.03 mm thickness)
Back Sheet	White multilayer polymer film
Temperature Range	-40°F to +194°F // -40°C to +90°C
Max Load	75 lbs / 34 (UL Standard) / 5400 Pa (IEC Standards)
Impact Resistance	Steel ball - 1.18 lbs / 535 g dropped from 51" / 1.3 m high

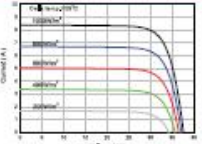
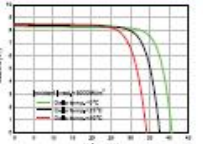
Specifications

Cells	Polycrystalline silicon solar cells 6" x 6" / 155 mm x 155 mm
Number of Cells	60 (5 x 12)
Dimensions (h / mm)	64.57 x 39.05 x 1.57 / 1540x925x40
Weight (lb / kg)	41.9 / 19.0

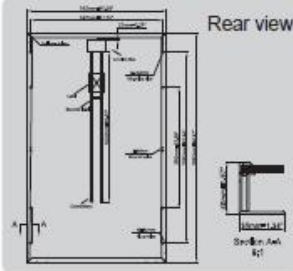
Temperature Coefficients

NOCT (°C)	45 ± 2
Temperature Coefficients of I _{sc} (% / °C)	0.05 ± 0.01
Temperature Coefficients of V _{oc} (% / °C)	-0.32 ± 0.02
Temperature Coefficients of I _m (% / °C)	-0.02 ± 0.02
Temperature Coefficients of V _m (% / °C)	-0.42 ± 0.03
Temperature Coefficients of P _m (% / °C)	-0.43 ± 0.05

IV Curves

Rear view



www.upsolar.com
UP-M250P-V2
Delivering safe solar

Anexo D. Síntesis de resultados obtenidos para el análisis de inclinación y orientación

	0-50	51-100	101-150	151-200	201-250	251-300	301-350	351-400	401-450	451-500	501-550	551-600	601-650	651-700	701-750	751-800	801-850	851-900	901-950	951-1000	1001-1050	1051-1100	1101-1150	1151-mas					
8-9 am	2,424 I(4)O(180) T(19,9)	0,37 I(0)O(90) T(21)		16,492 I(7)O(315) T(20,6)	29,64 I(0)O(315) T(24,1)	34,92 I(10)O(315) T(24,2)	26,442 I(4)O(315) T(22,1)	36,11 I(7)O(315) T(25,4)		48,43 I(60)O(270) T(22,7)	17,884 I(10)O(90) T(24)	31,114 I(4)O(45) T(28,7)	1,869 I(60)O(45) T(26,7)																
	0,473 I(10)O(225) T(20,5)	33,024 I(10)O(0) T(20,1)		6,747 I(15)O(180) T(22,9)		15,921 I(4)O(270) T(21,4)					27,9 I(10)O(180) T(28,7)	6,669 I(30)O(90) T(29)	29,948 I(4)O(270) T(27,6)																
		0,876 I(30)O(315) T(21,9)		13,09 I(30)O(270) T(22,4)								31,85 I(7)O(270) T(23,6)																	
		1,334 I(15)O(315) T(21,9)																											
9-10 am		2,448 I(0)O(270) T(20,9)	41,396 I(10)O(270) T(20,4)	2,046 I(30)O(0) T(23,2)	52,19 I(30)O(270) T(23,3)	43,21 I(4)O(225) T(23,7)	39,84 I(0)O(135) T(23,8)	37,468 I(10)O(315) T(24,3)			37,06 I(4)O(45) T(28,2)			28,215 I(15)O(180) T(29,8)	37,557 I(0)O(0) T(27,2)	38,735 I(7)O(45) T(27,4)	33,936 I(10)O(135) T(28,9)	43,935 I(10)O(270) T(29,1)											
		2,6 I(4)O(45) T(20,1)	14,5 I(15)O(270) T(23,4)	14,326 I(7)O(45) T(20,4)							44,7 I(60)O(270) T(25)				42,812 I(15)O(315) T(31,2)	43,018 I(0)O(135) T(29,1)	2,496 I(60)O(135) T(28,1)												
		0,798 I(10)O(270) T(20,8)	5,11 I(30)O(315) T(21,8)								41,561 I(7)O(315) T(27,7)				40,171 I(15)O(315) T(27)		42,704 I(7)O(315) T(24,3)												
											30,888 I(4)O(315) T(23,2)																		
10-11 am		9,016 I(10)O(315) T(20,7)	28,755 I(0)O(135) T(21)	1,944 I(30)O(45) T(23)	0,798 I(4)O(225) T(20,9)	52,124 I(7)O(270) T(21,3)	43,768 I(4)O(0) T(23,7)	10,6 I(10)O(0) T(23,6)		48,828 I(0)O(0) T(27,9)	45,095 I(15)O(270) T(26,4)			41,208 I(60)O(270) T(29,3)	28,574 I(30)O(180) T(31,2)	37,422 I(4)O(90) T(27,6)	44,928 I(15)O(0) T(32,8)	43,8 I(4)O(135) T(31,1)	14,384 I(60)O(180) T(26,9)	49,612 I(15)O(270) T(29,7)									
			24,852 I(30)O(0) T(21,7)	3,332 I(15)O(315) T(23,2)						29,602 I(0)O(315) T(27,9)				44,982 I(7)O(225) T(29,9)	46,315 I(30)O(315) T(28,3)	39,468 I(10)O(180) T(27,2)	44,745 I(4)O(270) T(27,1)	45,084 I(7)O(270) T(26,6)	46,816 I(10)O(45) T(29,1)										
																48,36 I(30)O(315) T(27,4)	57,036 I(10)O(315) T(29,2)												
11-12 pm		4,653 I(4)O(270) T(21,6)	46,028 I(0)O(135) T(24)	14,868 I(0)O(45) T(21,3)	36,16 I(7)O(45) T(21,4)	26,158 I(10)O(90) T(21,5)	10,75 I(30)O(135) T(23,7)	52,353 I(10)O(270) T(27,8)	56,7 I(15)O(45) T(28,4)		54,162 I(0)O(0) T(27,3)	12,92 I(30)O(0) T(24,2)			50,071 I(10)O(270) T(29)	50,634 I(4)O(90) T(30,2)		32,448 I(60)O(315) T(29,4)	44,696 I(4)O(135) T(28,9)	50,74 I(0)O(45) T(29,8)	47,382 I(30)O(270) T(28,4)								
											49,306 I(30)O(270) T(30,3)				54,06 I(7)O(225) T(33,6)				48,411 I(15)O(45) T(29)	51,944 I(7)O(135) T(28,8)	44,515 I(7)O(0) T(28)								
																				46,646 I(4)O(225) T(28,8)	44,515 I(7)O(0) T(28)								

12-1 pm	1,173 I(4)O(0) T(21,2)			12,474 I(30)O(45) T(27,6)		2,834 I(10)O(135) T(21,8)	42,84 I(4)O(0) T(26,7)	57,096 I(4)O(90) T(28,2)	24,15 I(10)O(315) T(25)		52,772 I(30)O(180) T(26,2)		32,445 I(60)O(45) T(29,8)		43,736 I(4)O(180) T(29,1)	53,176 I(0)O(90) T(28,6)	58,206 I(10)O(315) T(27,6)	51,975 I(0)O(315) T(29)				
							16,492 I(0)O(45) T(23,7)		55,432 I(4)O(180) T(27)						48,36 I(10)O(135) T(28,4)	45,6 I(7)O(225) T(30,2)	46,95 I(15)O(90) T(28,1)					
							56,842 I(7)O(180) T(24,4)								53,492 I(15)O(45) T(26,4)	49,59 I(30)O(45) T(29,6)	52,548 I(30)O(45) T(28,8)					
							50,544 I(10)O(0) T(30,4)										55,062 I(7)O(0) T(32,9)	53,152 I(7)O(315) T(28,9)				
							22,032 I(15)O(315) T(25,4)												31,331 I(0)O(0) T(26,4)			
1-2 pm			20,424 I(0)O(315) T(23,9)	35,64 I(10)O(45) T(21)	59,2 I(0)O(180) T(28,2)	14,326 I(30)O(315) T(26,5)	41,138 I(15)O(270) T(25,2)	32,175 I(4)O(315) T(25,3)		3,159 I(0)O(0) T(26,9)	53,9 I(7)O(0) T(24,3)			42,28 I(30)O(225) T(27)	43,186 I(7)O(225) T(28,2)	40,831 I(10)O(45) T(28)	50,568 I(7)O(45) T(28)	43,507 I(15)O(180) T(27,6)	48,345 I(4)O(315) T(27,9)	52,419 I(0)O(90) T(29,7)		
								29,164 I(10)O(0) T(25,9)							44,982 I(15)O(135) T(28,8)		54,339 I(10)O(0) T(27,4)	50,787 I(30)O(90) T(29,5)				
								36,733 I(4)O(270) T(25,4)										44,4 I(10)O(225) T(29,7)	46,428 I(60)O(90) T(29,1)			
								67,196 I(7)O(45) T(27,3)											48,363 I(15)O(315) T(26,9)	41,658 I(7)O(180) T(29,7)		
2-3 pm			10,437 I(0)O(315) T(25)	45,552 I(0)O(135) T(24,1)	48,127 I(30)O(90) T(26,9)	14,56 I(10)O(225) T(25,6)	35,995 I(15)O(315) T(28)	34,347 I(10)O(0) T(21,8)	28,71 I(4)O(45) T(25,9)	50,204 I(7)O(45) T(27,9)		35,631 I(0)O(180) T(29,3)		34,989 I(7)O(315) T(28,9)	41,334 I(7)O(135) T(28,6)	44,805 I(0)O(180) T(28,6)	46,81 I(15)O(0) T(27,3)	8,55 I(60)O(270) T(29,1)	57,682 I(30)O(45) T(29,2)	51,625 I(7)O(45) T(24,9)	4,828 I(60)O(135) T(28,7)	
									45,732 I(4)O(45) T(29,7)			26,809 I(15)O(45) T(26,4)		42,757 I(7)O(90) T(30)	39,78 I(7)O(315) T(27,9)	36,816 I(15)O(225) T(28,8)	47,712 I(4)O(135) T(26,1)					
3-4 pm			1,806 I(60)O(0) T(26,1)		27,556 I(60)O(0) T(27,7)	8,64 I(15)O(0) T(27,4)		44,85 I(10)O(45) T(24,1)	42,742 I(4)O(45) T(26,1)	23,639 I(60)O(0) T(27,8)	31,062 I(7)O(180) T(29,1)	34,43 I(0)O(225) T(28,7)	28,755 I(7)O(0) T(28,6)		43,364 I(30)O(90) T(27,3)	37,004 I(7)O(45) T(28,3)			39,9 I(7)O(45) T(25,7)			
			4,964 I(0)O(0) T(24,9)		40,948 I(10)O(45) T(25,1)	35,636 I(15)O(180) T(27,6)			40,119 I(10)O(90) T(28,7)	26,286 I(0)O(270) T(29,2)	25,038 I(15)O(270) T(28,6)		40,04 I(10)O(90) T(28,9)						39,79 I(30)O(45) T(28,4)			
			6,513 I(7)O(45) T(27,2)							30,987 I(0)O(0) T(24,8)	30,264 I(0)O(180) T(29,3)		44,1 I(4)O(90) T(26,8)									
4-5 pm	0,245 I(4)O(315) T(25)		12,614 I(0)O(225) T(26,7)	11,169 I(15)O(90) T(26,8)	7,011 I(0)O(45) T(26,4)	11,076 I(10)O(135) T(25,3)	15,694 I(15)O(90) T(28,3)	15,982 I(4)O(270) T(28,5)	25,487 I(0)O(315) T(28,7)	25,6 I(10)O(0) T(27,9)	32,55 I(30)O(135) T(28)		24,15 I(7)O(90) T(28,5)	25,179 I(10)O(90) T(26)	25,179 I(7)O(135) T(26,1)	26,88 I(4)O(45) T(27,5)						
				0,08 I(60)O(0) T(26,8)	10,65 I(0)O(225) T(25,7)	22,849 I(15)O(0) T(26,4)	23,925 I(0)O(270) T(29,3)	8,492 I(30)O(315) T(28)	22,464 I(7)O(180) T(28,9)	54,435 I(60)O(0) T(29)							20,493 I(10)O(0) T(27,9)					
					0,768 I(30)O(45) T(25,5)																	