



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN ENERGÍAS
RENOVABLES.

INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES.

TESIS

“EFECTO DE LAS SOMBRAS EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS”

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

PRESENTA

MONSERRAT GARCÍA HERNÁNDEZ.

DIRECTOR:

MTRO. OSCAR MARTÍNEZ AGUIRRE.

CO-DIRECTOR:

DR. LUIS ALBERTO HERNÁNDEZ DOMÍNGUEZ



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
SECRETARÍA GENERAL
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
Fecha: 23 de Noviembre de 2022

C. Montserrat García Hernández

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniería en Energías Renovables

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

"EFECTO DE LAS SOMBRAS EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE MÓDULOS

FOTOVOLTAICOS"

En la modalidad de: Tesis profesional.

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Dr. Joel Pantoja Enríquez

Dr. Guillermo Rogelio Ibáñez Duharte

Mtro. Oscar Martínez Aguirre

Firmas:

[Handwritten signatures of the reviewers]

Ccp. Expediente

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a mi familia por el apoyo que me brindo a lo largo del desarrollo de este proyecto.

A la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas por recibirme en su seno y permitirme crecer en el campo personal y académico.

Al Mtro. Oscar Martínez Aguirre por el apoyo académico y dirección de forma interna de la investigación dentro del instituto.

Al Dr. Luis Alberto Hernández Domínguez por la codirección fuera de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, por ser mi profesor y consejero, por dedicarme su espacio y su tiempo para motivarme, aconsejarme y enseñarme.

DEDICATORIA.

Dedico este proyecto:

Primeramente, a mis padres por brindarme todos los recursos necesarios que me han permitido llegar al punto donde estoy.

A mis padres y hermanas por confiar en mí, gracias por su apoyo incondicional y todos los consejos que me brindaron para cada día poder superarme personal y académicamente.

A mis hermanas mayores por ser de gran ayuda en el ámbito académico brindándome apoyo con sus conocimientos.

Finalmente, mi dedicatoria va dirigida a todos mis seres queridos, familia y amigos que de una manera u otra me han apoyado cuando los he necesitado en mi vida y a quienes hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

RESUMEN.

La energía solar fotovoltaica está bien posicionada con respecto a los demás tipos de energías renovables debido a su simplicidad con respecto a la sencilla conversión energética en comparación a otros procesos, además de su practicidad para ser utilizada ya sea en zonas rurales aisladas de la red eléctrica o en urbanizaciones. En este proyecto de investigación se analiza uno de los principales factores que provoca una disminución en la producción de energía entregada por un módulo fotovoltaico, como es el efecto de sombreado. Las pruebas experimentales se realizaron utilizando dos Módulos FV de Silicio Policristalino, de 280 Wp cada uno y 17,02% de eficiencia, uno de los módulos se utilizó como referencia y el otro se utilizó para la proyección de diferentes sombras, estas proyecciones fueron: a) sombra sobre una celda, en diferentes zonas del Módulo FV; b) sombra horizontal; en una línea de 6 celdas; c) sombra vertical; una línea de 10 celdas; d) sombra por cables; e) sombra provocada por un tubo; f) sombra sobre la mitad de las celdas del módulo; g) sombra provocado por el excremento de aves; h) sombra de la rama de un árbol. Además, estas proyecciones se aplicarán en dos escenarios 1) módulos fuera de línea; 2) en un sistema fotovoltaico en la red. Durante las evaluaciones se observó que, en el mejor de los casos, la eficiencia del módulo fotovoltaico sin sombra era aproximadamente del 16%, mientras que el módulo donde se proyectaban las diferentes sombras tenía una eficiencia menor al 15%, dependiendo de la sombra que se proyectaba. Por otra parte, en el peor de los casos, la sombra proyectada sobre el módulo fotovoltaico hace que la potencia sea nula. Se obtuvieron los resultados que permitieron analizar la magnitud de la pérdida de producción de energía causada por el sombreado en los módulos fotovoltaicos.

PALABRAS CLAVE.

Energía solar fotovoltaica, efecto de sombreado, pérdidas de producción de energía, eficiencia.

ABSTRACT.

Photovoltaic solar energy is well placed compared to other renewable energies due to its simplicity in energy conversion unlike to other processes, in addition to its practicality to be used both in rural areas secluded from the electricity grid and in big cities. Photovoltaic Solar energy, by its nature, is affected when the sun's rays are obstructed by objects. This research project analyzes one of the main factors that can cause a decrease in the energy production delivered by a photovoltaic module, such as the shading effect. The experimental tests were carried out using two Polycrystalline Silicon PV Modules, 280 Wp each and 17.02% efficiency, one of the modules was used as a reference and the other was used for the projection of different shadows, these projections were: a) shadow on a cell, at different zones of the PV Module; b) horizontal shadow, in a line of 6 cells; c) vertical shadow, a line of 10 cells; d) cable shadow; e) shadow caused by a pipe; f) shadow on half of the module cells; g) shade from bird droppings; h) shadow of a tree branch. In addition, these projections will be applied in two settings: 1) offline modules; 2) in an on grid photovoltaic system. During the evaluations it was observed that best case scenario, the efficiency of the photovoltaic module without shade went around 16%, while in the module where the different shadows were cast had an efficiency of less than 15%, depending on the shadow cast. Otherwise, in worst case scenario where the shadow cast on the PV module causes the power output to be Zero. Got the results that allowed to analyze the magnitude of the loss of energy production caused by shading on the photovoltaic modules.

KEY WORDS.

Solar photovoltaic energy, the shadow effect, energy production losses, efficiency.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.	17
1.1. INTRODUCCIÓN.....	18
1.2. ANTECEDENTES.....	20
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	28
1.4. OBJETIVOS.....	28
1.4.1. Objetivo General.	28
1.4.2. Objetivos Particulares.	28
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	29
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.	30
2.1 ENERGÍA SOLAR.	31
2.1.1 Radiación.....	31
2.1.2 Irradiancia.....	32
2.1.3 Irradianción.....	32
2.1.4 Constante Solar.	32
2.1.5 Hora Solar Pico (Hsp).	32
2.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	33
2.2.1 Efecto Fotovoltaico.	33
2.2.2 Módulos Fotovoltaicos.....	33
2.2.3 Diodo Baypass En Módulos Fotovoltaicos.	35
2.2.4 Cáculo De Potencia.	35
2.2.5 Factor De Forma.....	36
2.2.6 Cálculo De Eficiencia.....	36
2.2.7 Orientación E Inclinación.....	37
2.2.8 Sistemas Fotovoltaicos Autónomos.	37
2.2.9 Sistemas Fotovoltaicos Interconectados A Red.	38
2.2.10 Inversores Fotovolotaicos.	39
2.3 POSIBLES SOMBRAS EN LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	40
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.	41
3.1. EQUIPOS FOTOVOLTAICOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.	42

3.2.	ETAPA I. ANÁLISIS DEL EFECTO DE SOMBRAS EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DESCONECTADOS.....	45
3.3.	ETAPA II. ANÁLISIS DEL EFECTO DE SOMBRAS EN UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A RED.	50
	CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
4.1.	ETAPA I. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL EFECTO DE SOMBRAS EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DESCONECTADOS.	57
4.1.1.	Cubrir una celda en diferentes puntos del módulo (esquinas superiores e inferiores).....	58
4.1.2.	Cubrir una línea de celdas del módulo FV de forma horizontal.	62
4.1.3.	Cubrir una línea de celdas del módulo FV de forma vertical (línea vertical de celdas del extremo derecho e izquierdo).....	65
4.1.4.	Proyección de una línea simulando un cable.	67
4.1.5.	Proyección de una sombra simulando una varilla o tubo.....	70
4.1.6.	Cubrir la mitad del módulo.	72
4.1.7.	Simulación de una mancha pequeña similar el excremento de aves.....	74
4.1.8.	Proyección de la sombra de una rama.....	77
4.2.	ETAPA II. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL EFECTO DE SOMBRAS EN UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A RED.	80
4.2.1.	Cubrir una celda en diferentes puntos del módulo (esquinas superiores e inferiores).....	82
4.2.2.	Cubrir una línea de celdas del módulo FV de forma horizontal.	85
4.2.3.	Cubrir una línea de celdas del módulo FV de forma vertical (línea vertical de celdas del extremo derecho e izquierdo).....	88
4.2.4.	Proyección de una línea simulando un cable.	90
4.2.5.	Proyección de una sombra simulando una varilla o tubo.....	92
4.2.6.	Cubrir la mitad del módulo.	94
4.2.7.	Simulación de una mancha pequeña similar el excremento de aves.....	96
4.2.8.	Proyección de la sombra de una rama.....	98
	CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	100
	REFERENCIAS.	103

ANEXOS.	109
ANEXO 1. MONTAJE DEL INVERSOR E INTALACIÓN ELÉCTRICA.....	109
ANEXO 2. FORMATO DE LAS TABLAS UTILIZADAS PARA LA ANOTACIÓN DE LOS DATOS RECABADOS EN LAS DOS ETAPAS DEL PROYECTO.	112
ANEXO 3. GRÁFICAS COMPLEMENTARIAS DE LA ETAPA 1 DE LOS RESULTADOS.	114
ANEXO 4. GRÁFICAS COMPLEMENTARIAS DE LA ETAPA 2 DE LOS RESULTADOS.	118

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1. Tipos de Radiación [27].	31
Ilustración 2. Representación de efecto fotovoltaico [29].	33
Ilustración 3. Estructura de un módulo FV [30].	34
Ilustración 4. Esquema de celda fotovoltaica [31].	34
Ilustración 5. Sistema Fotovoltaico Autónomo [36].	38
Ilustración 6. Esquema de un sistema interconectado a la Red [37].	38
Ilustración 7. Sistema Fotovoltaico con sombra [40].	40
Ilustración 8. Módulo fotovoltaico CONNERA Astralduo280-P60	42
Ilustración 9. Microinversor APsystems YC600B.	43
Ilustración 10. Termometro digital con sonda de temperatura.	43
Ilustración 11. Multímetro de Gancho.	44
Ilustración 12. Solarímetro.	44
Ilustración 13. Instalación de los módulos fotovoltaicos [Elaboración propia].	45
Ilustración 14. Proyección de sombra en una celda del módulo en las cuatro esquinas [Elaboración propia].	46
Ilustración 15. Proyección de sombra en una línea de celdas de forma horizontal del módulo FV [Elaboración propia].	46
Ilustración 16. Proyección de sombra en una línea de celdas de forma vertical del módulo FV [Elaboración propia].	46
Ilustración 17. Proyección de la sombra de un cable sobre un módulo FV [Elaboración propia].	47
Ilustración 18. Proyección de sombra de una barrilla o tubo sobre un módulo FV [Elaboración propia].	47
Ilustración 19. Proyección de sombra en la mitad del módulo FV [Elaboración propia]. ...	47
Ilustración 20. Simulación de mancha de excremento de aves [Elaboración propia].	48
Ilustración 21. Proyección de la sombra de una rama sobre un módulo FV [Elaboración propia].	48
Ilustración 22. Sistema fotovoltaico interconectado a red [Elaboración propia].	50

Ilustración 23. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la celda inferior izquierda de uno de los módulos [Elaboración propia].	51
Ilustración 24. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la celda inferior derecha de uno de los módulos [Elaboración propia].	51
Ilustración 25. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la celda superior izquierda de uno de los módulos [Elaboración propia].	51
Ilustración 26. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la celda superior derecha de uno de los módulos [Elaboración propia].	52
Ilustración 27. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la línea superior de celdas de uno de los módulos [Elaboración propia].	52
Ilustración 28. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la línea vertical de celdas de extremo derecho de uno de los módulos [Elaboración propia].	52
Ilustración 29. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la línea vertical de celdas del extremo izquierdo de uno de los módulos [Elaboración propia].	53
Ilustración 30. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra de un cable sobre uno de los módulos [Elaboración propia].	53
Ilustración 31. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra de una varilla o tubo sobre uno de los módulos [Elaboración propia].	53
Ilustración 32. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la mitad de las celdas de uno de los módulos [Elaboración propia].	54
Ilustración 33. Sistema fotovoltaico interconectado a red con la sombra de una mancha simulando excremento de aves sobre uno de los módulos [Elaboración propia].	54
Ilustración 34. Sistema fotovoltaico interconectado a red con la sombra de una rama de árbol sobre uno de los módulos [Elaboración propia].	54
Ilustración 35. Módulos fotovoltaicos instalados.	57
Ilustración 36. Módulo fotovoltaico con sombra en la celda inferior derecha.	58
Ilustración 37. Módulo fotovoltaico con sombra en la línea horizontal superior de celdas.	62
Ilustración 38. Módulo Fotovoltaico con sombra en la línea vertical de celdas del extremo izquierdo.	65
Ilustración 39. Módulo Fotovoltaico con sombra de un cable.	67
Ilustración 40. Módulo Fotovoltaico con sombra de una varilla o tubo.	70

Ilustración 41. Módulo Fotovoltaico con la mitad de sus celdas cubiertas.	72
Ilustración 42. Módulo Fotovoltaico con la sombra del excremento de aves.	74
Ilustración 43. Módulo Fotovoltaico con la sombra de una rama.	77
Ilustración 44. Sistema interconectado a red con microinversor.	80
Ilustración 45. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en una celda de uno de los módulos del sistema.	82
Ilustración 46. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la línea superior de celdas de uno de los módulos del sistema.	85
Ilustración 47. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la línea de celdas de forma vertical del extremo izquierdo de uno de los módulos del sistema.	88
Ilustración 48. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra simulando un cable sobre uno de los módulos del sistema.	90
Ilustración 49. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra simulando un tubo sobre uno de los módulos del sistema.	92
Ilustración 50. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la mitad de las celdas de forma vertical del extremo izquierdo de uno de los módulos del sistema.	94
Ilustración 51. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra simulando excremento de aves sobre uno de los módulos del sistema.	96
Ilustración 52. Sistema fotovoltaico interconectado a red con la sombra de una rama de un árbol sobre uno de los módulos del sistema.	98
Ilustración 53. Microinversor instalado en la estructura metálica de los módulos.	109
Ilustración 54. Tubo conduit instalado de la estructura metálica de los módulos a la pared.	109
Ilustración 55. Tubo conduit instalado en la pared exterior del taller que se conectó al tubo instalado en la estructura metálica de los módulos.	110
Ilustración 56. Tubo conduit instalado a lo alto de la pared exterior del taller.	110
Ilustración 57. Conexión eléctrica a la pastilla termomagnética y al centro de carga.	111
Ilustración 58. Conexión del microinversor a los módulos fotovoltaicos y a la red eléctrica.	111

ÍNDICE DE ECUACIONES.

Ecuación 1	32
Ecuación 2	35
Ecuación 3	36
Ecuación 4	36

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Ficha técnica del módulo fotovoltaico marca CONNERA modelo ASTRALDUO280-P60 [41].....	42
Tabla 2. Ficha técnica del microinversor APsystems YC600B [42].....	43
Tabla 3. Especificaciones del multímetro de gancho.	44
Tabla 4. Especificaciones del solarímetro.	44
Tabla 5. Formato de recolección datos de la Etapa 1: Efecto de sombras en módulos desconectados.	112
Tabla 6. Formato de recolección de datos de la Etapa 2: Efecto de las sombras en un sistema interconectado a red.....	113

ÍNDICE DE GRÁFICAS.

Gráfica 1a y Gráfica 1b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.....	59
Gráfica 2. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.	61
Gráfica 3a y Gráfica 3b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear una línea de celdas de forma horizontal.....	62
Gráfica 4. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear una línea de celdas de forma horizontal.	64
Gráfica 5a y Gráfica 5b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear una línea de celdas de forma vertical.....	65

Gráfica 6. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear una línea de celdas de forma vertical.	66
Gráfica 7a y Gráfica 7b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al proyectar una sombra simulando un cable.	67
Gráfica 8. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al proyectar una sombra simulando un cable.	68
Gráfica 9a y Gráfica 9b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al proyectar una sombra simulando una varilla o tubo.	70
Gráfica 10. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al proyectar una sombra simulando una varilla o tubo.	71
Gráfica 11a y Gráfica 11b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear la mitad del módulo.	72
Gráfica 12. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear la mitad del módulo.	73
Gráfica 13a y Gráfica 13b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al simular la sombra del excremento de aves.	74
Gráfica 14. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al simular la sombra del excremento de aves.	75
Gráfica 15a y Gráfica 15b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al proyectar sobre él la sombra de una rama.	77
Gráfica 16. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al proyectar sobre él la sombra de una rama.	79
Gráfica 17a y Gráfica 17b. Impacto en las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre una de sus celdas.	83
Gráfica 18. Impacto en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre una de sus celdas.	83
Gráfica 19a y Gráfica 19b. Impacto en las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre la línea superior de celdas.	86

Gráfica 20. Impacto en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre la línea superior de celdas. ..	86
Gráfica 21a y Gráfica 21b. Impacto en las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre la línea de celdas de forma vertical.	88
Gráfica 22. Impacto en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre la línea de celdas de forma vertical.	89
Gráfica 23a y Gráfica 23b. Impacto en las características eléctricas de los módulos conectados en paralelo cuando incide la sombra de un cable sobre uno de los módulos del sistema.	90
Gráfica 24. . Impacto en la producción de energía de los módulos conectados en paralelo cuando incide la sombra de un cable sobre uno de los módulos del sistema.	91
Gráfica 25a y Gráfica 23b. Impacto en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra simulando un tubo.	92
Gráfica 26. . Impacto en las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra simulando un tubo.	93
Gráfica 27a y Gráfica 25b. Impacto en las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre la mitad de las celdas del módulo.	94
Gráfica 28. . Impacto en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre la mitad de las celdas del módulo.	95
Gráfica 29a y Gráfica 29b. Impacto en las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando se proyecta una sombra similar al excremento de aves sobre uno de los módulos.	96
Gráfica 30. Impacto en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando se proyecta una sombra similar al excremento de aves sobre uno de los módulos.	97

Gráfica 31a y Gráfica 31b. Impacto en las características eléctricas de los módulos conectado en paralelo cuando incide la sombra de una rama de un árbol sobre uno de los módulos del sistema.	98
Gráfica 32. Impacto en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando incide la sombra de una rama de un árbol sobre uno de los módulos.	99
Gráfica 33a y Gráfica 33b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.	114
Gráfica 34. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.	114
Gráfica 35a y Gráfica 35b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.	115
Gráfica 36. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.	115
Gráfica 37a y Gráfica 37b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.	116
Gráfica 38. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.	116
Gráfica 39a y Gráfica 39b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear una línea de celdas de forma vertical.	117
Gráfica 40. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear una línea de celdas de forma vertical.	117
Gráfica 41. Voltaje AC de salida del microinversor	118
Gráfica 42. Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.	118
Gráfica 43 . Voltaje AC de salida del microinversor.	119
Gráfica 44. Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.	119
Gráfica 45. Voltaje AC de salida del microinversor.	120
Gráfica 46. Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.	120
Gráfica 47. Voltaje AC de salida del microinversor.	121
Gráfica 48. Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.	121
Gráfica 49. Voltaje AC de salida del microinversor.	122
Gráfica 50. Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.	122

Gráfica 51. Voltaje AC de salida del microinversor.	123
Gráfica 52. Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.....	123
Gráfica 53. Voltaje AC de salida del microinversor.	124
Gráfica 54 Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.....	124
Gráfica 55. Voltaje AC de salida del microinversor.	125
Gráfica 56. Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.....	125

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.

El capítulo 1 presenta una breve descripción de la situación actual de la energía solar fotovoltaica, haciendo un particular énfasis en las herramientas existentes para la cuantificación de sombras y el efecto que estas tienen sobre la producción de los módulos fotovoltaicos.

Además, en este capítulo se fundamenta los motivos que incentivaron el desarrollo del presente proyecto, determinando la importancia de dar seguimiento a la investigación y desarrollo del tema de las sombras en los módulos fotovoltaicos y se establecieron los objetivos con los cuales este proyecto pretende aportar nueva información a el tema en cuestión.

1.1. INTRODUCCIÓN.

Las fuentes de energía renovable se han vuelto una solución factible y necesaria para reducir los problemas ambientales como lo son los gases de efecto invernadero suscitando cambios climáticos, la contaminación del agua, suelo, aire y daños irreparables a los sistemas ecológicos, todos estos daños son consecuencia del abuso excesivo de los combustibles fósiles. Debido a todos los temas ambientales las energías renovables se han podido posicionar en el mundo como una fuente de energía limpia, inagotable y de creciente competitividad industrial [1].

Dentro del desarrollo de las energías renovables podemos encontrar la energía solar fotovoltaica que se ha convertido en una alternativa prometedora, puesto que cuenta con una disponibilidad de recurso prácticamente inagotable, no requiere de una gran infraestructura, es práctica y segura.

En la actualidad la energía solar fotovoltaica está bien posicionada con respecto a los demás tipos de energías renovables debido a su simplicidad con respecto a la sencilla conversión energética en comparación a otros procesos, además de su practicidad para ser utilizada ya sea en zonas rurales aisladas de la red eléctrica o en urbanizaciones. Las instalaciones fotovoltaicas requieren un mantenimiento sencillo, muy versátil y adaptable a diferentes situaciones. Gracias a su simplicidad no requiere grandes esfuerzos económicos y humanos lo que ha hecho que al pasar los años se haya reducido considerablemente el coste asociado con la tecnología de los componentes fotovoltaicos haciendo que sea más rentable desde el punto de vista económico y operativo.

Aunque el posicionamiento de la energía solar fotovoltaica sea competente, todavía hay espacio para hacer mejoras adicionales, principalmente en lo que se refiere al rendimiento de las celdas fotovoltaicas, que son los componentes más importantes para este tipo de energía. Aumentar la eficiencia de las celdas mitigando los factores que afectan su rendimiento se ha convertido en uno de los principales focos de investigación en los últimos años [1].

La eficiencia de las celdas fotovoltaicas es uno de los elementos más determinantes para el buen funcionamiento de un sistema fotovoltaico, la eficiencia de un módulo fotovoltaico es generalmente medido en condiciones standard de ensayo (Standard Test Conditions o STC): radiación de 1000 W/m^2 (incidencia normal), distribución espectral AM 1.5 y temperatura de la célula a 25° C . La eficiencia de la celda solar no es igual a la eficiencia del panel. La eficiencia del panel es generalmente de 1 a 3% inferior a la eficiencia de las celdas solares debido a la reflexión de vidrio, efecto de sombra, las temperaturas más altas, etc. [2].

1.2. ANTECEDENTES.

La energía solar fotovoltaica se ha convertido en una alternativa para generar energía, puesto que cuenta con una disponibilidad de recurso inagotable. En la actualidad, esta tecnología está bien posicionada con respecto a los demás tipos de energías renovables debido a su simplicidad para ser utilizada en puntos aislados de red, zonas rurales o de difícil acceso, requieren de un mantenimiento sencillo, modular y muy versátil, adaptable a diferentes situaciones. Sin embargo, todavía hay espacio para mejoras adicionales principalmente en las celdas solares, que son los elementos más importantes para este tipo de generación de energía. La eficiencia de las celdas solares es probablemente el elemento más determinante para el funcionamiento de un sistema fotovoltaico por lo cual, aumentar la eficiencia mitigando los factores que afectan el rendimiento de las celdas se ha convertido en el principal foco de investigación en los últimos años [3].

Un artículo publicado en el 2009 dentro en la revista Modern Applied Science, presenta el estudio del efecto de las sombras en módulos fotovoltaicos conectados en serie y paralelo, con el propósito de determinar que conexión refleja una menor pérdida de energía. Utilizando los datos eléctricos de dos módulos fotovoltaicos con 36 celdas, se realizaron simulaciones en el software PSPICE, de los circuitos eléctricos de los módulos fotovoltaicos conectados en serie y en paralelo, bajo diferentes perfiles de sombreado. Comparando ambos circuitos eléctricos, establecieron que la configuración en paralelo de los módulos fotovoltaicos representa una menor pérdida de energía por el efecto sombra [4].

A. Ibrahim publicó un artículo en el 2011, explicando que, mediante el uso de una lámpara halógena de 1000W, que simulaba la radiación solar incidente en una celda fotovoltaica de silicio con dimensiones de 10cm x 6 cm; logró determinar que la potencia producida por esta celda se redujo de un 5% a un 15%, esto debido a factores como; la variación en las condiciones climáticas, la suciedad de la celda por la acumulación de polvo, y por ultimo al efecto de sombreado. Asimismo, determino que el I_{sc} disminuía un 2.78% y el V_{oc} un 0.863% [5].

En el 2011 un grupo de alemanes que pertenecían al Instituto Fotovoltaico de Berlín, realizaron una investigación enfocada en el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos al sombrear las celdas que lo conforman. En este trabajo determinaron que, las sombras que inciden en más de una celda del módulo FV, afectan de mayor forma su producción de energía, disminuyendo la intensidad de corriente que entregan. Mientras que, las sombras pequeñas causan un menor descenso en la intensidad de corriente, reduciendo el efecto en la producción de energía [6].

En el séptimo Congreso Internacional de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, se presentó un estudio en el cual se empleó el software Simscape para modelar una celda fotovoltaica y posteriormente un módulo fotovoltaico conformado por 32 de las celdas modeladas previamente, el estudio tuvo en cuenta su resistencia al conectares en serie y en paralelo, bajo diferentes patrones de sombreado, con el propósito de determinar la configuración que sea menos susceptible de sufrir desajustes eléctricos debido a problemas de sombra. En el estudio se simulo a conexión en serie y en paralelo de 3 módulos fotovoltaicos, a los cuales se les proyectaba 6 diferentes perfiles de sombra. La comparación de los resultados de las simulaciones de ambas configuraciones, estableció que en la mayoría de los perfiles de sombreado los módulos conectados en paralelo entregan una mayor producción de energía, considerando esta configuración la adecuada para reducir los desajustes eléctricos provocados por el efecto sombra [7].

En 2013 la compañía de inversores SOLAREEDGE realizo una investigación sobre el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos bajo condiciones de sombras y como sus productos podrían contrarrestar cualquier impacto negativo que las sombras ocasionen en la producción de energía del sistema, ya que es prácticamente imposible evitar por completo la incidencia de sombras causadas por árboles, antenas, entro otras. Simularon escenarios donde en un sistema fotovoltaico ubicado en el techo de una casa residencial proyectando sombras que se presentan comúnmente, se estimó que en los sistemas fotovoltaicos con la incidencia parcial de sombras las pérdidas anuales de energía van desde un 5% hasta un 25% [8].

En el año 2013 Samuel Rincón y Adrián Álvarez alumnos de la Universidad de Valladolid, España, desarrollaron un proyecto con el objetivo de estudiar la energía fotovoltaica, en específico el desarrollo de sistemas fotovoltaicos aplicados para la integración en los edificios ya cimentados. Para este estudio realizaron simulaciones desde diferentes puntos de vista del edificio Duque de Lerma de Valladolid, buscando la mejor ubicación para la integración de un sistema fotovoltaico en este edificio sin la interferencia de sombras; dichas simulaciones realizadas en diferentes softwares como PVSyst, FV-Expert, Sketchup, entre otros. Como resultado del proyecto se concluyó que en cualquiera de las perspectivas propuestas para la integración del sistema fotovoltaico las pérdidas en la producción de energía por sombras incidentes van desde 1% hasta un 40% [9].

Un artículo publicado en el 2014 por la International Journal of Applied Engineering Research and Development (IJAERD), estudio experimentalmente los parámetros de; voltaje a circuito abierto, corriente en corto circuito y los parámetros en los puntos de máxima potencia, bajo el efecto de 4 perfiles de sombra sobre una celda fotovoltaica en un módulo fotovoltaico de tipo monocristalino. El estudio estableció que el factor de intensidad de corriente tanto a corto circuito como a máxima potencia, es el parámetro que mayor afectación tiene por el efecto sombra, y se señala que al sombrear un 25% de la celda la potencia máxima entregada es de 0.00952W y al sombrear al 100% la celda la producción máxima es de 0.00032W [10].

En 2014 Antonio Palomo realizó por 15 meses un análisis estadístico de las anomalías que inciden en la producción de plantas fotovoltaicas, el proyecto se realizó con los datos de 24 plantas fotovoltaicas ubicadas en España e Italia, en las cuales se registraron 674 incidencias de las cuales el 44% son incidencias debidas a factores externos de las plantas fotovoltaicas como los son las sombras, la suciedad en los módulos etc [11].

En 2016, Susanne Gooijer y Lisanne van Dijk realizaron un estudio comparativo entre el rendimiento bajo 2 perfiles de sombreado, de los tres módulos fotovoltaicos más comerciales en la actualidad; el módulo fotovoltaico de silicio monocristalino, el módulo de silicio policristalino y el módulo de telurio de cadmio (CdTe). Las eficiencias de los módulos sin

ningún tipo de sombreado son de: 19.5% perteneciente al módulo de silicio monocristalino; 17.3% correspondiente al módulo de silicio policristalino; y 4.8% perteneciente al módulo de telurio de cadmio. Al sombrear verticalmente los módulos se observó que la pérdida de eficiencia del módulo monocristalino y policristalino es peor y mucho más rápida, que la pérdida de eficiencia del módulo de telurio de cadmio, aunque, en el caso de sombrear más del 70% de forma vertical los tres módulos apenas producen energía. En cambio, cuando la sombra se proyecta de forma horizontal apenas hay diferencia entre la eficiencia de los tres módulos. Sin embargo, cuando se observa la eficiencia total, se ve claramente que el módulo de telurio de cadmio (CdTe) tiene una eficiencia muy por debajo de la eficiencia de los módulos monocristalinos y policristalinos, por lo tanto, aunque el módulo de telurio de cadmio reacciona de una mejor manera bajo el efecto de sombreado, las cifras absolutas de eficiencia seguían siendo muy bajas, así que, naturalmente la eficiencia de los módulos monocristalinos y policristalinos es mejor, aun cuando se sombrea el módulo [12].

Un estudiante de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Sudan, realizó un proyecto en el 2016, donde, estudio el efecto de las sombras y de la suciedad por el polvo sobre el rendimiento de los módulos fotovoltaicos. A través de mediciones de las características eléctricas de dos módulos fotovoltaicos individuales, conectadas en serie y paralelo. Los módulos se encontraban instalados en Soba, Khartoum, Sudan, este estudio estableció que ambos factores reducen la intensidad de corriente del módulo afectado. Al sombrear parcialmente uno de los módulos y medir por separado las características eléctricas de los módulos, determinó que la intensidad de corriente disminuye de 3.5A a 2.9A, conectando los módulos en serie la intensidad de corriente disminuye de 3.56A a 3.57A, por último al conectar en paralelo los módulos la intensidad de corriente disminuye de 6.92A a 5.7A [13].

En 2016 Pablo González estudio 17 parques fotovoltaicos en Sevilla, España, durante 15 meses, en los cuales se registró que las pérdidas de energía asociadas a incidencias registradas que afectaron a la producción han sido de 0.42% por cada parque fotovoltaico. De las cuales concluyo que el 47.73% de estas pérdidas de energía están asociadas a causas externas como la proyección de sombras y con un 6.09% a causas meteorológicas, dejando al porcentaje restante de pérdidas a causas relacionadas a fallos en el cableado, inestabilidad en la red

eléctrica, entre otras. Concluyendo también que las pérdidas de energía generalmente no superan el 1% de la producción total [14].

En el 2016 tres alumnos de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina desarrollaron en MATLAB-Simulink un programa de simulación que permitía estudiar el comportamiento de arreglos fotovoltaicos bajo condiciones de radiación variable por condiciones climáticas y bajo condiciones de sombras, en este programa establecieron tres posibles perfiles de avance de la sombra incidente sobre el sistema FV, el primer perfil es el avance de la sombra de forma vertical que afecta cada fila de módulos instalados en el sistema, el segundo perfil es el avance de la sombra de forma horizontal que afecta a cada columna de módulos instalados en el sistema y por último está el perfil de avance de forma inclinada de la sombra el cual afecta a los módulos de forma diagonal [15].

Jensen R. E en 2017 desarrollo un diseño 3D en el software ArcGis con las herramientas Sun Shadow Volume, con el objetivo de proporcionar información sobre la utilización óptima de la radiación solar en los futuros proyectos en zonas urbanas. El diseño consistió en cuatro fases, de las cuales las tres primeras se centraban en el análisis, establecimiento y procesamiento de las características de la zona de interés y la cuarta fase interpretaba los resultados y documentaba la totalidad de las características [16].

En 2018 un estudio publicado por The International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM), presento una recolección detallada de investigaciones que abordaban el tema del efecto de las sombras sobre la eficiencia de los módulos fotovoltaicos pertenecientes a sistemas fotovoltaicos. De esta recopilación de información se observó que, al sombrear de un 30% al 40% de un sistema fotovoltaico, la potencia se reduce un 70% a 80%, en relación a la generación total de energía del sistema [17].

En el primer Congreso Internacional de Industria, Electricidad y Electrónica (ICIEE, por sus siglas en inglés) realizado en el 2018, se presentó un estudio, donde se investigó la influencia de las sombras sobre las características eléctricas de los módulos pertenecientes a un sistema

fotovoltaico, y por consiguiente el efecto de las sombras en la producción total del sistema. Mediante el software PVsyst realizaron una modelización de un sistema fotovoltaico de 1 kW ubicado en el laboratorio de ingeniería eléctrica de la Universidad de Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia. Con la base de datos Meteorology & Solar Energy perteneciente a la NASA se conoce que en esta ubicación hay una radiación incidente de 4.81 kWh/m^2 . Los resultados indicaron que las pérdidas de energía causadas por el efecto sombra son de 20.8%, reduciendo 792W en relación a la potencia nominal del sistema [18].

Rubén Fonseca alumno perteneciente a la maestría de la Unersidad de Gävle elaboro un proyecto en el 2018, donde, mediante el software PVsyst, modelo un sistema fotovoltaico constituido por 12 módulos conectados en serie, ubicados en ciudad de Borlänge, en el centro de Suecia, en el cual simulo escenarios de diferentes sombreados. En este estudio, se determinó que, la reducción en la producción de energía anual causada por la incidencia de diferentes sombras, era de alrededor del 1,2%, lo que significa que, para este caso específico, el impacto de la sombra no era significativo [19].

Journal of Electrical and Electronics Engineering publicó un artículo en 2019, que presentaba, el desarrollo de un modelo analítico de una celda fotovoltaica, así como de todo el módulo, mediante el uso del software MATLAB, con el propósito de estudiar las características de salida de un módulo fotovoltaico, así como el efecto de la sombra parcial sobre su rendimiento individual y en sistemas conectado en serie y paralelo. A partir de diferentes experimentos, se demuestra que los efectos de las sombras parciales modifican el punto de máxima potencia del módulo fotovoltaico de forma individual, como en los sistemas conectados en seria y paralelo. Observo que en el punto de máxima potencia el módulo sin ninguna sombra, produce alrededor de 97W, mientras un módulo con una sombra parcia del 25% del módulo produce aproximadamente 72W [20].

En un artículo publicado en el 2020 por la revista científica TecnoLógicas, se presenta un análisis experimental del rendimiento en términos de potencia de dos sistemas fotovoltaicos conectados de diferente manera; un sistema estaba conectado en serie a un inversor central mientras el otro sistema se encontraba conectado en paralelo a microinversores, cada sistema

contaba con tres módulos FV y se encontraban instalados en la ciudad de Manizales, Colombia. El estudio concluyó que, aunque ambos sistemas se ubicaban en el mismo lugar y bajo las mismas condiciones climáticas y de sombreado ocasional el sistema fotovoltaico conectado a microinversores entrega una mayor producción de energía de hasta un 16.5% comparado con el sistema conectado al inversor central, de esta forma se observa como los microinversores disminuyeron el impacto de cualquier factor que afectara la eficiencia de los módulos como lo son; la suciedad, las sombras, la baja radiación por lluvia entre otras [21].

En 2020 se realizó un modelo basado en MATLAB y Simulink para estimar y cuantificar las pérdidas energéticas por efecto del sombreado. Para el modelo utilizaron datos de Mar de Plata, Argentina, planteando distintas situaciones de sombreado sobre los módulos fotovoltaicos. El modelo desarrollado obtuvo resultados similares a los de otras herramientas disponibles en el mercado como PVsyst. Los resultados obtenidos estuvieron dentro de los márgenes de errores esperados por dichos modelos, en el orden del 10%. Por otro lado, se compararon con Simulink los resultados al momento de calcular los coeficientes lineales de pérdida por sombreado, obteniendo errores del orden del 2%. Finalmente, se usó Python para emplear los resultados obtenidos en Matlab en cálculos anuales de producción energética. Los resultados obtenidos se contrastaron con los arrojados por PVsyst. Se obtuvieron diferencias mensuales de hasta 30% y diferencias anuales de hasta 3.3% [22].

En el 2021 Pablo Sánchez Arroyo realizó un estudio del rendimiento de una planta fotovoltaica ubicada en la Universidad de Valladolid, España, estudio en el cual diagnostica los fallos y defectos existentes en la planta conformada por 20 módulos policristalinos. De acuerdo a la prueba experimental se determinó que en un día donde la radiación solar incidente estaba entre los 866W/m y 1031W/m la planta fotovoltaica supondría una pérdida de 1.76% en la producción de energía, pérdida relacionada a el efecto de sombras producidas sobre los módulos [23].

The Journal of the Association of Energy Engineers publicó en el 2022 un artículo en donde se presentaba el estudio de dos módulos fotovoltaicos, uno de ellos operando en condiciones óptimas, mientras que, el otro módulo se recubría con una fina capa de polvo y se le

proyectaban sombras. Se comprobó la disminución significativa de la potencia eléctrica producida del módulo sometido en ambos casos, observando una reducción del 40% en el caso del módulo con polvo y una reducción de la producción de energía de un 80% en el caso del módulo con sombra. En términos de eficiencia, se observó una disminución de alrededor del 6% en el caso del módulo con polvo y del 9% en el caso del módulo con sombra, en comparación a la eficiencia del módulo limpio. De los resultados se comprendió que el efecto de una sombra parcial es mayor que el del polvo en el rendimiento del módulo fotovoltaico [24].

Patrick Welsh desarrollo un proyecto en el 2022, en el cual analizaba el efecto de sombreado en los módulos y en los sistemas fotovoltaicos. El análisis lo realizó mediante la simulación de un sistema conformado por tres módulos fotovoltaicos, simulación desarrollada en el Software SIMULINK. Observo que la intensidad de corriente fue la más afectada por la variación de radiación incidente causada por las sombras. En el caso donde uno de los tres módulos del sistema se encuentre totalmente sombreado, observo pérdidas en la producción de energía de 37% con respecto a la producción total del sistema, por otro lado, en el caso donde dos módulos del sistema se encontraron sombreados totalmente, observo pérdidas del 74% en la producción de energía en comparación de la producción total del sistema [25].

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En las instalaciones fotovoltaicas, sobre todo en aquellas ubicadas en zonas urbanas o residenciales, existen obstáculos en el entorno que pueden proyectar sombras sobre los módulos fotovoltaicos reduciendo así su rendimiento.

Por lo general el espacio disponible para ubicar los módulos es limitado, más aún en las zonas urbanas donde los módulos son generalmente ubicados en techos, terrazas o espacios públicos. Esta limitación en el espacio hace que sea de particular interés investigar el impacto que tendrá la proyección de sombras sobre el sistema fotovoltaico y su producción energética.

El problema relacionado a la incidencia de sombras sobre los módulos fotovoltaicos es que ocasiona pérdidas en la producción energética, lo cual implica un mayor tiempo de amortización de una instalación fotovoltaica. Por lo cual, es de gran interés determinar la magnitud del efecto negativo o de decremento en la producción de energía de un sistema fotovoltaico producido por la incidencia de sombras.

1.4. OBJETIVOS.

1.4.1. OBJETIVO GENERAL.

Analizar el efecto en la producción de energía eléctrica de un sistema fotovoltaico cuando existe la incidencia de sombras sobre un módulo fotovoltaico.

1.4.2. OBJETIVOS PARTICULARES.

- Instalar sistemas fotovoltaicos en diferentes configuraciones: módulos sin conectar y sistema interconectado a red.

- Cuantificar a través de mediciones el decremento energético en sistemas fotovoltaicos de diferentes configuraciones donde hay sombras incidentes en un módulo fotovoltaico del sistema.
- Analizar e interpretar el comportamiento del módulo con sombra a través de los datos recabados de las mediciones.

1.5. JUSTIFICACIÓN.

El consumo de energía es un factor básico para las actividades de la vida cotidiana y el progreso, razón por la cual, la demanda de las energías renovables ha incrementado, ya que, su aplicación no produce emisiones contaminantes para el medio ambiente. Esta demanda ha provocado un gran interés por determinar la eficiencia de los dispositivos y métodos de conversión energética renovable.

La tecnología fotovoltaica es una de las más desarrolladas dentro del área de las tecnologías de las energías renovables, por lo cual, es esencial determinar la eficiencia de los módulos fotovoltaicos y estudiar los factores como las condiciones climáticas, el factor de suciedad del módulo, las condiciones de sombreado; que ocasionan una disminución en la productividad energética de los sistemas fotovoltaicos.

La investigación del efecto de sombreado en los módulos fotovoltaicos es escasa, por lo que, se requiere recaudar los datos pertinentes de un sistema bajo estas circunstancias para así poder valorar diversas alternativas para un mejor rendimiento en los sistemas.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.

En este apartado se establecieron los conceptos teóricos que sustentan el desarrollo y entendimiento del proyecto y la metodología implementada. Para comprender el efecto de las sombras en la producción de energía eléctrica de los módulos fotovoltaicos es necesario conocer el origen del proceso de transformación del recurso solar a electricidad el cual se efectúa a través de módulos fotovoltaicos cuyo principio de conversión proviene de fenómenos electro-físicos.

2.1 ENERGÍA SOLAR.

La energía solar es una energía renovable que aprovecha la radiación electromagnética procedente del sol y transforma esta radiación en energía eléctrica o energía térmica.

2.1.1 RADIACIÓN.

Dentro del sol se lleva a cabo un proceso de fusión nuclear, donde se emite energía electromagnética que viaja a una velocidad finita, comportándose como onda o partícula según el caso. La radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas [26].

La Radiación incide de las siguientes formas en una superficie:

- Radiación directa: Es la radiación solar que no sufre alteraciones cuando llega a la superficie de la tierra, se puede decir que la radiación directa es limpia y completa [1].
- Radiación difusa: Es una de los tipos de radiación solar, la cual ya ha sufrido varias alteraciones y desviaciones antes de llegar a la tierra, es decir esta pasa por distintos objetos que se encuentran en su camino, por ejemplo, los gases atmosféricos [1].
- Radiación reflejada: Radiación que llega a la superficie después de haberse reflejado en superficies como montañas, el mismo suelo, edificios, etc.



Ilustración 1. Tipos de Radiación [27].

2.1.2 IRADIANCIA.

La irradiancia se define como la potencia solar que incide en el planeta por unidad de área, su unidad de medida es W/m^2 .

Por lo general, el valor que se le asigna a la irradiancia solar incidente en la superficie terrestre es de $1000 W/m^2$, sin embargo, este valor puede variar debido a los movimientos de rotación y traslación, alcanzando el valor máximo en días despejados [26].

2.1.3 IRADIACIÓN.

La irradiación es un concepto que parte de la radiación solar, se define a la irradiación como la cantidad de radiación que incide en una determinada área durante un intervalo de tiempo, su unidad de medida es Wh/m^2 [26].

2.1.4 CONSTANTE SOLAR.

La constante solar se define como la cantidad de energía solar (W/m^2) que incide perpendicularmente en la cima de la atmósfera (extraterrestre) a la distancia media Tierra-Sol. El valor determinado por la NASA indica que la constante solar es de $1367.7 W/m^2$ [2].

2.1.5 HORA SOLAR PICO (HSP).

La hora solar pico se podría definir como una unidad que se encarga de medir la irradiación solar y definirla en términos de tiempo (en horas). Para conocer la hora solar pico de una zona específica es necesario conocer la irradiación incidente de la zona en cuestión. La HSP se calcula con la siguiente fórmula [28]:

$$HSP = \frac{Irradiación}{1000W/m^2} \quad Ecuación 1$$

2.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.

A partir de la energía solar se desarrolla la energía solar fotovoltaica, esta consiste en transformar la radiación solar en energía eléctrica empleando tecnología basada en el efecto fotovoltaico [2].

2.2.1 EFECTO FOTOVOLTAICO.

El efecto fotovoltaico es la capacidad que tienen algunos elementos semiconductores para absorber fotones (nombre que reciben las partículas de luz del sol), y liberar una corriente de electrones. Los electrones al quedar libres pueden transitar a través del material semiconductor, de esta forma se produce una corriente eléctrica [28].

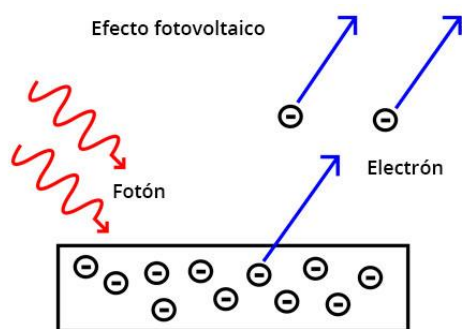


Ilustración 2. Representación de efecto fotovoltaico [29].

2.2.2 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.

Los módulos fotovoltaicos son los dispositivos encargados de transformando la energía solar en energía eléctrica en forma de corriente continua. Los módulos están formados por una variedad de celdas que están relacionadas entre sí. Las mismas que constan de un material semiconductor que por lo general es el Silicio [28].

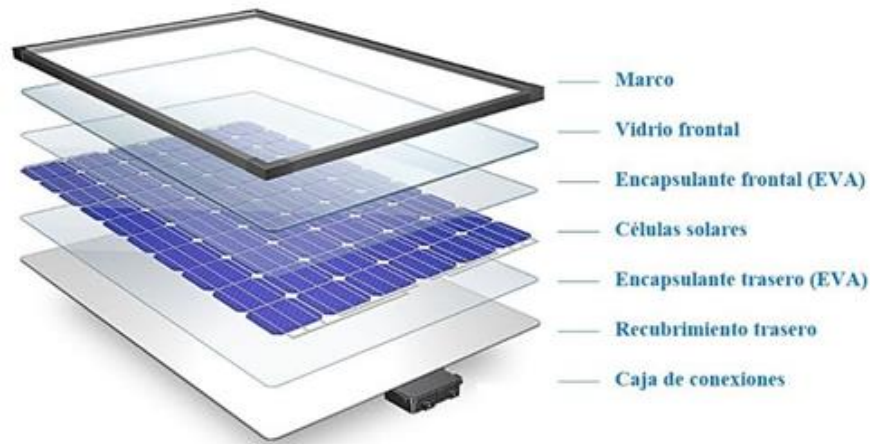


Ilustración 3. Estructura de un módulo FV [30].

Las celdas fotovoltaicas están compuestas por dos capas: una tipo “n” (electrón libre) que es un enlace del silicio y el fosforo y otra tipo “p” (huevo disponible) la cual es el enlace del silicio y el boro. Cuando la radiación incide en la capa “n” los electrones se dispersan con el fin de encontrar un equilibrio, mientras que en la capa “p” se detecta la región donde hay disponibilidad de huecos. La unión de estas capas produce un campo eléctrico y mediante un conductor externo que conecta ambas capas, en donde circulan los electrones creando la corriente eléctrica [28].

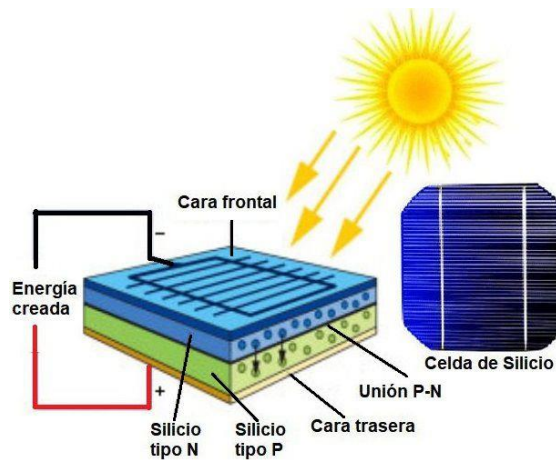


Ilustración 4. Esquema de celda fotovoltaica [31].

2.2.3 DIODO BAYPASS EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.

Un diodo, es un componente electrónico de dos terminales que permite la circulación de la corriente eléctrica a través de él en un solo sentido. Los diodos de bypass se encuentran en la caja de conexiones del módulo e impiden que un módulo absorba corriente de otro de los módulos del grupo si en uno o más de estos se produce alguna sombra, cuando se tiene un arreglo de paneles en serie. Generalmente en el arreglo completo de células fotovoltaicas de un panel, se instala un diodo de bypass por cada rama de 20 células en serie [32].

Los diodos de bypass protegen individualmente cada módulo fotovoltaico de posibles daños ocasionados por sombras que se generen sobre su superficie, ya sean producto de suciedad, excremento de aves, arboles, etc. En el caso de que una de las células reciba sombra, la corriente evitará pasar por la celda, pasando por el diodo, por lo que se pierde rendimiento. Luego de pasar por el diodo la corriente sigue circulando normalmente por la serie de células hasta el final para poder cargar las baterías [32].

Los diodos en los módulos fotovoltaicos tienen como propósito prevenir el consumo de energía cuando las células están sombreadas o dañadas como también prevenir que se invierta el flujo de corriente hacia los módulos (polarización inversa) [33].

2.2.4 CÁLCULO DE POTENCIA.

El cálculo de la potencia de un módulo o de un sistema fotovoltaico se basa en la multiplicación de la intensidad de corriente y el voltaje. Se pueden obtener dos potencias; la potencia máxima teórica la cual se calcula con los datos de corriente y voltaje a máxima potencia, datos que se proporcionan en las fichas técnicas de los módulos; por otro lado tenemos la potencia real calculada con el voltaje a circuito abierto y corriente a corto circuito [28].

$$P = V * I \quad \text{Ecuación 2}$$

2.2.5 FACTOR DE FORMA.

El factor de forma es la relación entre la potencia máxima teórica y la potencia real [34].

$$FF = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Es un factor que sirve como dato para hallar la eficiencia del módulo fotovoltaico.

Para facilitar los cálculos, se ha declarado que el FF debe ser menor a la unidad de acuerdo a la calidad del módulo fotovoltaico.

- FF en los módulos fotovoltaicos cristalinos y policristalinos oscila de 0.70 a 0.85.
- FF en módulos fotovoltaicos amorfos oscila de 0.5 a 0.7 [34].

2.2.6 CÁLCULO DE EFICIENCIA.

La eficiencia de un módulo es el valor de la energía eléctrica aprovechada del total de toda la energía solar impactada sobre la superficie del módulo, ya que se comprende que no toda la radiación solar se convierte en electricidad, por ello, cada módulo cuenta con su eficiencia representativa propia [34].

$$\eta = \frac{FF * V_{oc} * I_{sc}}{1000W/m^2 * \text{Área}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

FF: Factor de forma.

Voc: Voltaje a circuito abierto.

Isc: Intensidad de corriente a corto circuito.

2.2.7 ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN.

Para determinar la inclinación de los paneles fotovoltaicos, en primer lugar, es necesario conocer en que época del año va a haber más consumo eléctrico.

En México se estableció que la inclinación idónea para un módulo FV es en un consumo primordial en invierno: el ángulo de inclinación debe ser igual a la latitud MÁS 15 grados mientras que en el consumo primordial en verano: el ángulo de inclinación debe ser igual a la latitud MENOS 15 grados [28].

La orientación idónea para dirigir los paneles solares es hacia el sur (ángulo azimutal de 180°). Si orientamos los módulos hacia esta dirección, la instalación de módulos fotovoltaicos recibirá la máxima irradiación solar posible durante el día y, por tanto, el rendimiento del sistema será óptimo. Asimismo, es importante verificar que no haya sombras sobre nuestro sistema fotovoltaico [28].

Al orientar los paneles hacia el sur, la radiación solar incide perpendicularmente a la superficie y, por tanto, se obtiene la máxima eficacia. Sin embargo, en ocasiones será imposible ubicarlos de este modo, por lo que se debe buscar la orientación que más se aproxime para que las pérdidas del sistema de autoconsumo solar sean mínimas [28].

2.2.8 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS.

Los sistemas autónomos, generalmente son utilizados en zonas donde no se tiene acceso a la red eléctrica. Este sistema satisface la demanda eléctrica y cumple la función de acumular energía que se utiliza en horas de la noche.

Los sistemas autónomos están compuestos por módulos fotovoltaicos que captan la energía solar; un sistema de almacenamiento de energía como lo son las baterías; un controlador de carga encargado de proteger la batería contra sobrecargas o sobredescargas; el inversor, que

es el que transforma la corriente continua en corriente alterna, la misma que es utilizada para el funcionamiento de los aparatos eléctricos en los hogares [35].

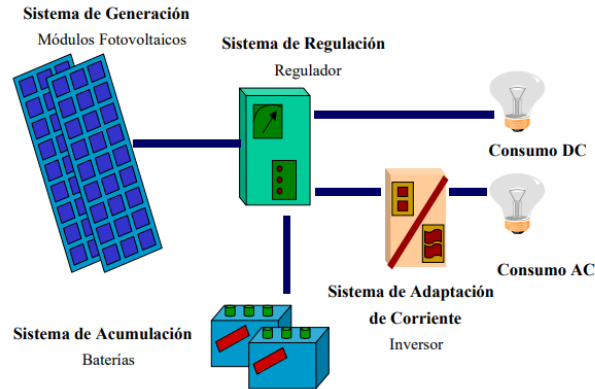


Ilustración 5. Sistema Fotovoltaico Autónomo [36].

2.2.9 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTERCONECTADOS A RED.

El sistema interconectado a la red al igual que el sistema autónomo aprovecha la radiación solar mediante los módulos fotovoltaicos, la convierte en electricidad con ayuda del inversor de corriente y a diferencia del autónomo este no utiliza un controlador de carga ni baterías ya que como su nombre lo dice interactúa con la red eléctrica de la CFE por medio de un medidor bidireccional que permite el flujo de la energía eléctrica tanto de los paneles hacia la red y viceversa. Cuando la energía generada es mayor que la requerida por el inmueble, el excedente pasará al sistema de CFE y será registrada (descontada) por el medidor bidireccional de energía [35].

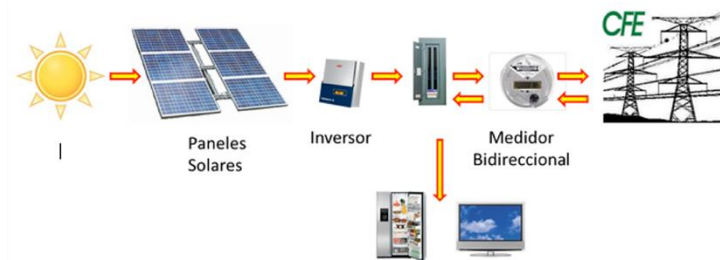


Ilustración 6. Esquema de un sistema interconectado a la Red [37].

2.2.10 INVERSORES FOTOVOLTAICOS.

Los inversores son equipos que transforman la corriente continua producida directamente de los módulos fotovoltaicos a corriente alterna para el consumo domiciliario.

Los inversores pueden ser clasificado según su conexión con los módulos fotovoltaicos, en inversores centrales o string y microinversores [38].

Un inversor central se conecta a módulos fotovoltaicos en serie donde toda la potencia es sumada; el número de paneles interconectados viene dado por la potencia nominal a la que el inversor está diseñado para funcionar, la cual no debe ser superada. Estos inversores son los más utilizados y los más económicos del mercado, siendo su uso principal en instalaciones sin la presencia de sombras ya que si uno de los módulos baja su producción todo el sistema se verá afectado.

Un microinversor, por otra parte, se conectan solamente a uno o hasta 4 módulos; estos transforman la corriente continua en alterna de forma individual para cada módulo. Este modelo ofrece mejores condiciones que los inversores centrales, ya que disminuye el efecto de sombreado y puede sacar siempre la máxima potencia de cada módulo [39].

2.3 POSIBLES SOMBRAS EN LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.

Se han desarrollado investigaciones para identificar los factores que afectan el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos, con el fin de mitigar sus efectos y lograr mejoras significativas en términos de eficiencia para este tipo de sistemas. Dichos factores se clasifican en propios o externos de acuerdo con su naturaleza, de operación o de entorno respectivamente. Variaciones climáticas, alta temperatura de la célula solar y exposición al medio ambiente, por ejemplo, pueden afectar el rendimiento de los paneles solares considerablemente [3].

El efecto de sombreado es causado cuando se obstaculiza la luz que impacta sobre la superficie del panel provocando desajustes de voltaje y corriente en el sistema. Esto se debe principalmente a formaciones de sombras producidas por elementos cercanos a los paneles como árboles, estructuras o agentes externos que impide a la luz solar llegar uniformemente sobre la superficie del panel. Las sombras provocan pérdidas en la recolección de energía y así se reduce la potencia de salida y la eficiencia en la conversión de energía de los sistemas fotovoltaicos. Un panel solar que está bajo los efectos de sombreado recolecta energía de forma desigual, lo que conlleva a presentar fluctuaciones en la potencia entregada [3].



Ilustración 7. Sistema Fotovoltaico con sombra [40].

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.

Para la cuantificación y el análisis del efecto de la incidencia de distintas sombras sobre sistemas fotovoltaicos en diferentes configuraciones fue necesario que el proyecto se dividiera en dos etapas.

En este capítulo 3 en primer lugar se menciona y/o describe los equipos e instrumentos que serán utilizados en el desarrollo de ambas etapas del proyecto, posterior a esto se presenta el desglose de las actividades que se ejecutaron en cada una de las etapas, con el fin de llevar a cabo el estudio de la generación fotovoltaica y la influencia de la incidencia de sombras.

3.1. EQUIPOS FOTOVOLTAICOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.

Antes de comenzar con el desarrollo metodológico de las etapas del proyecto se indicará los equipos e instrumentos que se utilizaron.

Los equipos fotovoltaicos que se utilizaron son los siguientes:

- Dos módulos fotovoltaicos módulos fotovoltaicos policristalinos de la marca CONNERA modelo AstralDuo280-P60.



Ilustración 8. Módulo fotovoltaico CONNERA Astralduo280-P60

MÓDULO ASTRALDUO280-P60	
Especificaciones eléctricas (AM=1.5, 1000W/m ² , TC=25°C).	
Potencia Pico (Wp)	280W
Voltaje de circuito abierto (Voc)	39V
Corriente de corto circuito (Isc)	9.25A
Voltaje a máxima potencia (Vmp)	31.4V
Corriente a máxima potencia (Imp)	8.92A
Máximo voltaje del sistema.	1500Vcc
Características mecánicas.	
Dimensiones.	1658 x 992 x 30mm
Número de celdas.	60 policristalinas.

Tabla 1. Ficha técnica del módulo fotovoltaico marca CONNERA modelo ASTRALDUO280-P60 [41].

- Un microinversor APsystems modelo YC600B.



Ilustración 9. Microinversor APsystems YC600B.

MICROINVERSOR APSYSTEMS YC600B.	
Datos de entrada (DC)	
Máximo voltaje de entrada	60V
Rango de voltaje MPPT	22V-48V
Máxima corriente de entrada	12A x 2
Datos de salida (AC)	
Máxima potencia de salida	550W
Voltaje de salida	120V
Máxima corriente de salida	4.57A

Tabla 2. Ficha técnica del microinversor APsystems YC600B [42].

Se utilizaron los siguientes instrumentos de medición:

- Termómetros.



Ilustración 10. Termómetro digital con sonda de temperatura.

- Multímetro.



Ilustración 11. Multímetro de Gancho.

MULTIMETRO DE GANCHO UNI-T MODELO UT203+	
Especificaciones.	Rango.
Voltaje AC	600V
Corriente AC	400A
Voltaje DC	600V
Corriente DC	400A

Tabla 3. Especificaciones del multímetro de gancho.

- Solarímetro.



Ilustración 12. Solarímetro.

SOLARIMETRO 1333
Gama: 200W/ m ² , 634 BTU/(m ² * h)
Respuesta espectral: 400-1100nm
Tiempo de muestreo 0.4 seg
Tamaño: 111 x 64 x 32 mm

Tabla 4. Especificaciones del solarímetro.

3.2. ETAPA I. ANALISIS DEL EFECTO DE SOMBRAS EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DESCONECTADOS.

La primera etapa del proyecto consistió en desarrollar diferentes escenarios de sombreado sobre módulos desconectados, con el fin de analizar el efecto de la proyección de diferentes sombras sobre uno de los módulos desconectados. El procedimiento que se realizó en esta etapa se desglosa en las siguientes actividades:

- I. Instalación de los módulos fotovoltaicos policristalinos de la marca CONNERA modelo AstralDuo280-P60.

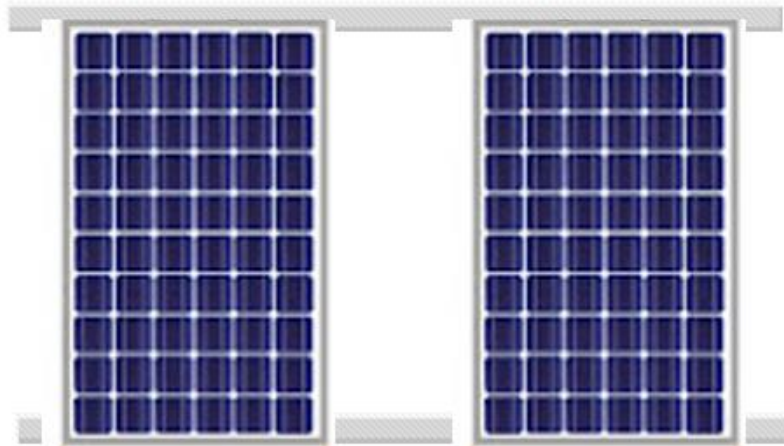


Ilustración 13. Instalación de los módulos fotovoltaicos [Elaboración propia].

- II. Mediciones con duración de 5 horas, con intervalos de 10 minutos entre cada medición con el fin de recabar datos experimentales como los de: radiación, temperatura de los módulos, voltaje a circuito abierto e intensidad de corriente de corto circuito tanto del módulo de referencia como del módulo donde se proyectaron cada día una diferente sombra:

- Cubrir una celda en diferentes puntos del módulo (esquinas superiores e inferiores).



Ilustración 14. Proyección de sombra en una celda del módulo en las cuatro esquinas [Elaboración propia].

- Cubrir una línea de celdas del módulo FV de forma horizontal.



Ilustración 15. Proyección de sombra en una línea de celdas de forma horizontal del módulo FV [Elaboración propia].

- Cubrir una línea de celdas del módulo FV de forma vertical (línea vertical de celdas del extremo derecho e izquierdo).

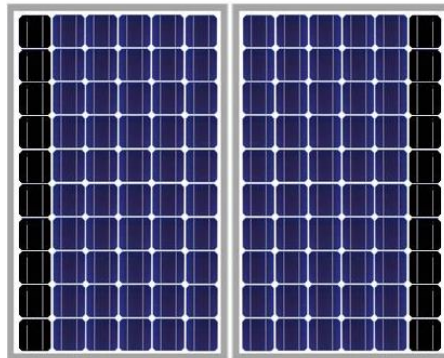


Ilustración 16. Proyección de sombra en una línea de celdas de forma vertical del módulo FV [Elaboración propia].

- Proyección de una línea simulando un cable.

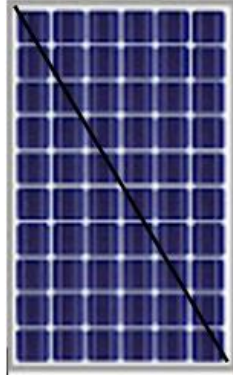


Ilustración 17. Proyección de la sombra de un cable sobre un módulo FV [Elaboración propia].

- Proyección de sombra simulando una varilla o tubo.

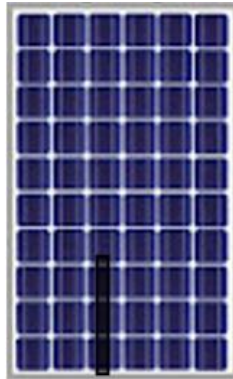


Ilustración 18. Proyección de sombra de una barrilla o tubo sobre un módulo FV [Elaboración propia].

- Cubrir la mitad del módulo.

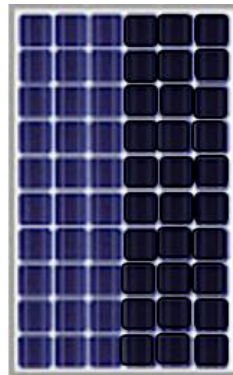


Ilustración 19. Proyección de sombra en la mitad del módulo FV [Elaboración propia].

- Simulación de una mancha pequeña similar el excremento de aves.

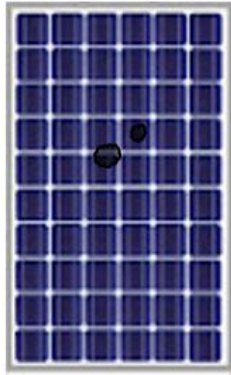


Ilustración 20. Simulación de mancha de excremento de aves [Elaboración propia].

- Proyección de la sombra de una rama.



Ilustración 21. Proyección de la sombra de una rama sobre un módulo FV [Elaboración propia].

- III. Calcular la potencia de ambos módulos de acuerdo a la ecuación 2, utilizando los de los datos de voltaje a circuito abierto e intensidad de corriente a corto circuito que se recabaron en las mediciones.
- IV. Calcular la eficiencia de ambos módulos de acuerdo a la ecuación 4, en donde el primer dato que se requiere es el factor de forma el cual se calcula con la ecuación 3, ya obtenido el factor de forma, los demás datos que se utilizaron para el cálculo de la eficiencia son los valores registrados en las mediciones de: voltaje a circuito abierto, intensidad de corriente a corto circuito y la radiación incidente del lugar donde se realizaron las pruebas experimentales.

- V. Elaboración en el programa OriginPro de las gráficas de: voltaje, intensidad de corriente y potencia de ambos módulos con los datos recabados en los puntos anteriores.

- VI. Análisis del efecto de las sombras en el sistema a través de los datos recabados y las gráficas realizadas.

3.3. ETAPA II. ANÁLISIS DEL EFECTO DE SOMBRAS EN UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A RED.

El procedimiento de la segunda etapa consistía en replicar los pasos hechos previamente en la primera etapa con la diferencia de que en esta última etapa estos pasos se ejecutaron en un sistema fotovoltaico interconectado a red, realizando dicho procedimiento de la siguiente forma:

- I. Instalación de un sistema fotovoltaico interconectado a red con los siguientes componentes:
 - Dos módulos fotovoltaicos policristalinos conectados en paralelo.
 - Un microinversor APsystems modelo YC600B.
 - Un centro de carga y una pastilla electromagnética de 20A.

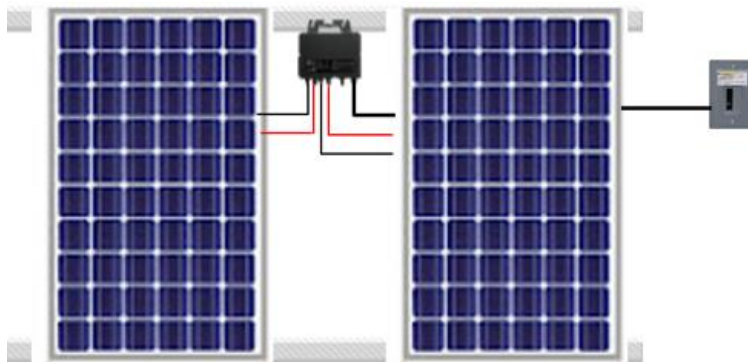


Ilustración 22. Sistema fotovoltaico interconectado a red [Elaboración propia].

- II. Mediciones con duración de 5 horas, con intervalos de 10 minutos entre cada medición con el fin de recabar datos experimentales como los de: radiación, temperatura de los módulos, voltaje a máxima potencia e intensidad de corriente a máxima potencia de cada uno de los módulos, voltaje e intensidad de corriente de salida del microinversor, todos estos datos obtenidos bajo las circunstancias del efecto de las siguientes proyecciones de sombras:

- Cubrir una celda en diferentes puntos del módulo (esquinas superiores e inferiores).

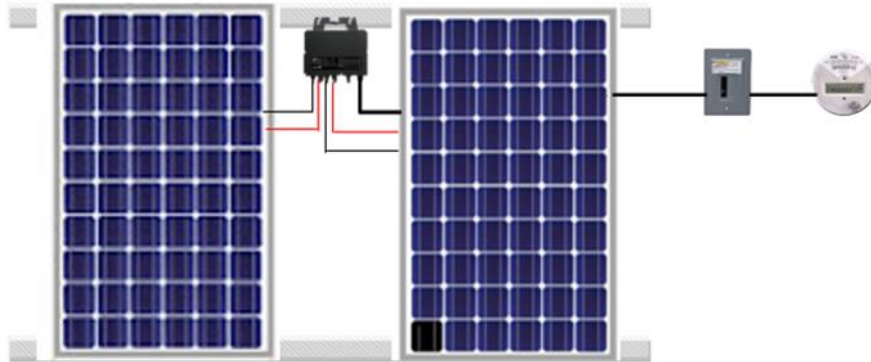


Ilustración 23. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la celda inferior izquierda de uno de los módulos [Elaboración propia].

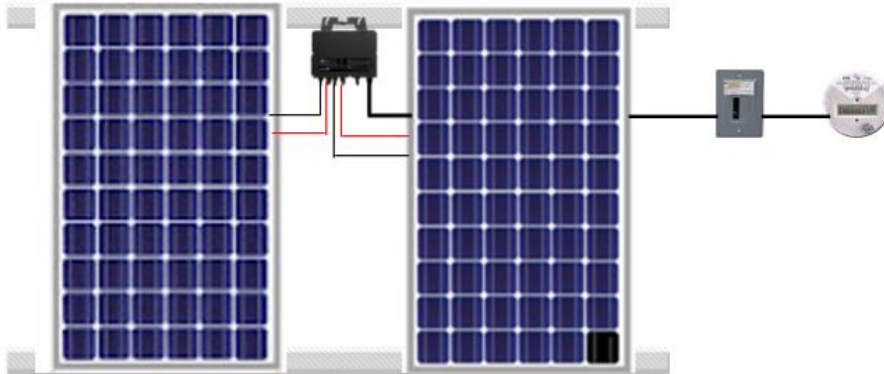


Ilustración 24. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la celda inferior derecha de uno de los módulos [Elaboración propia].

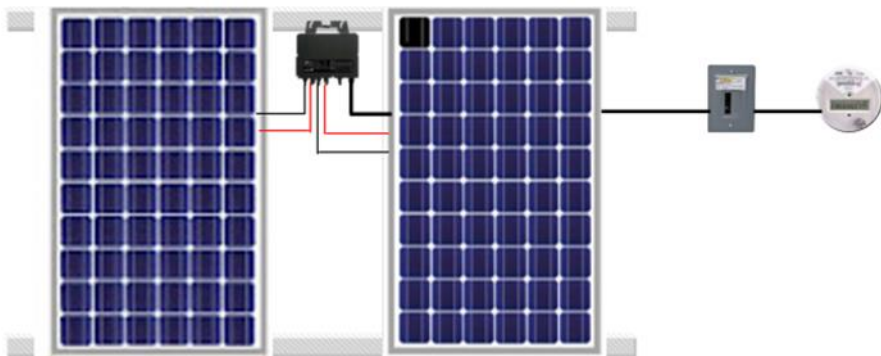


Ilustración 25. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la celda superior izquierda de uno de los módulos [Elaboración propia].

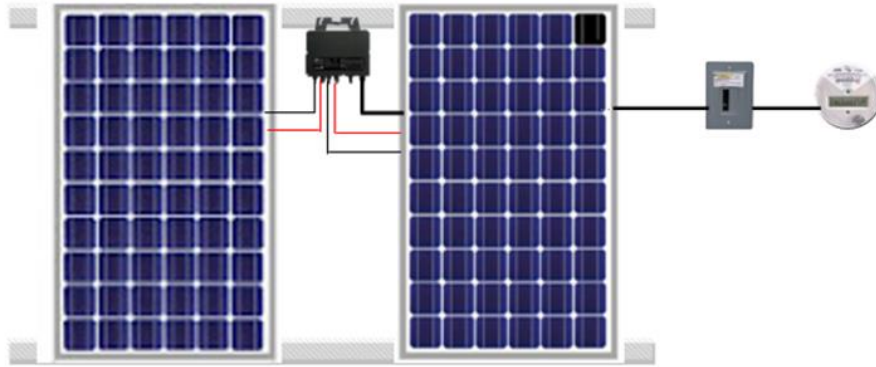


Ilustración 26. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la celda superior derecha de unos de los módulos [Elaboración propia].

- Cubrir una línea de celdas de del módulo FV de forma horizontal.

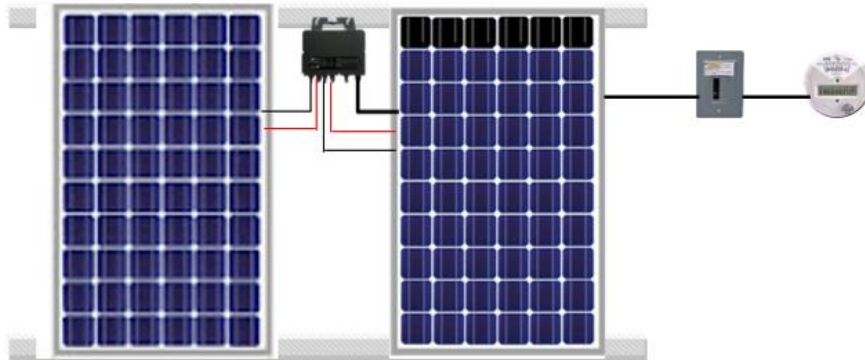


Ilustración 27. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la línea superior de celdas de uno de los módulos [Elaboración propia].

- Cubrir una línea de celdas del módulo FV de forma vertical (línea vertical de celdas del extremo derecho e izquierdo).

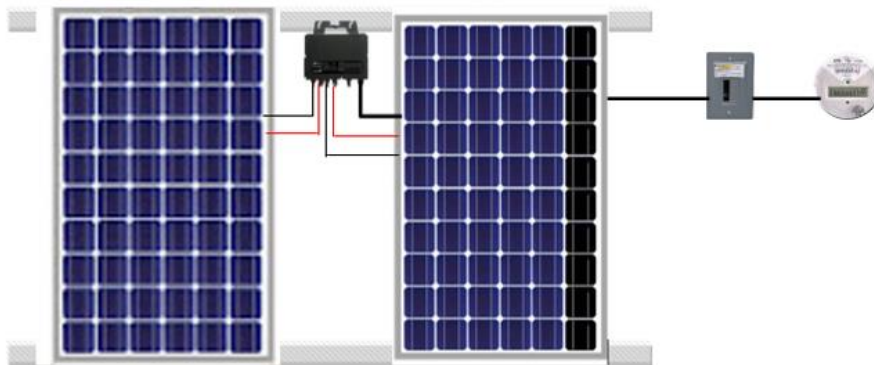


Ilustración 28. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la línea vertical de celdas de extremo derecho de uno de los módulos [Elaboración propia].

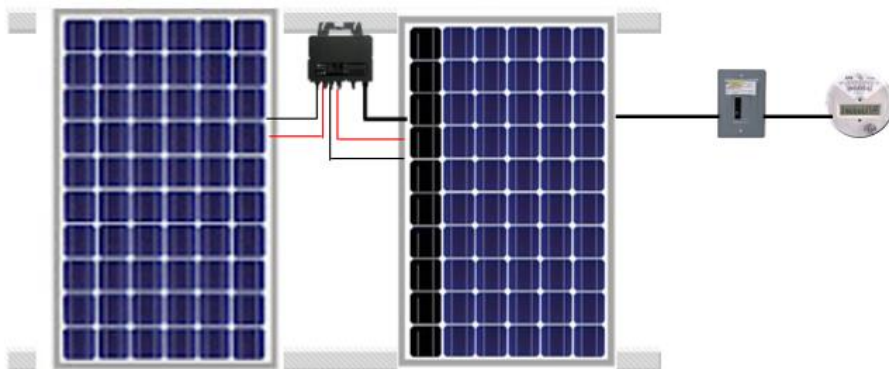


Ilustración 29. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la línea vertical de celdas del extremo izquierdo de uno de los módulos [Elaboración propia].

- Proyección de una línea simulando un cable.

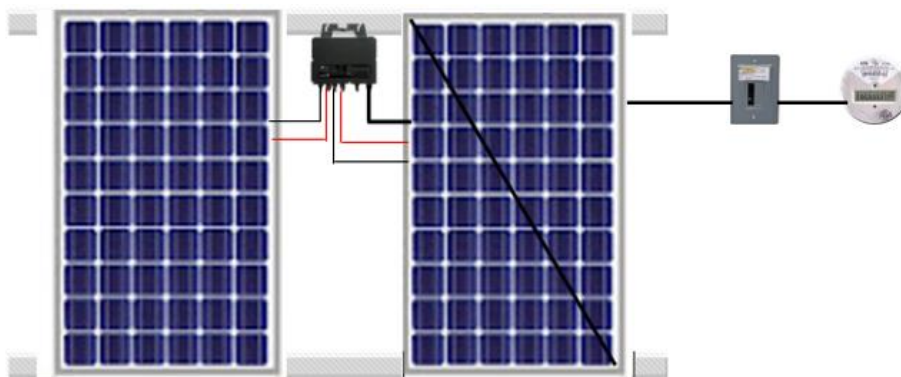


Ilustración 30. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra de un cable sobre uno de los módulos [Elaboración propia].

- Proyección de una sombra simulando una varilla o un tubo

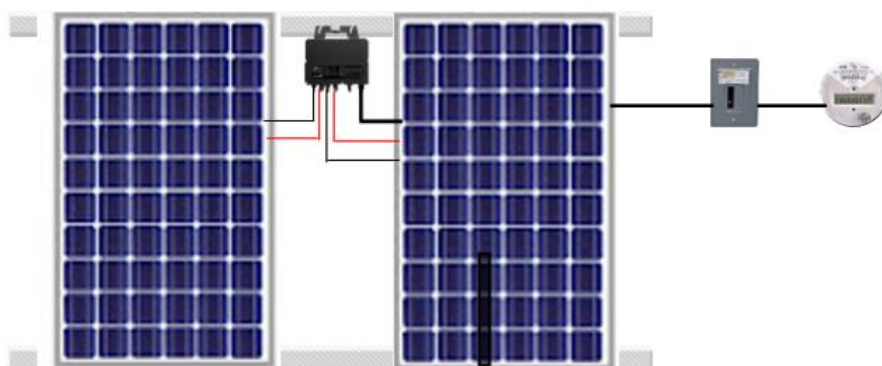


Ilustración 31. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra de una varilla o tubo sobre uno de los módulos [Elaboración propia].

- Cubrir la mitad del módulo.

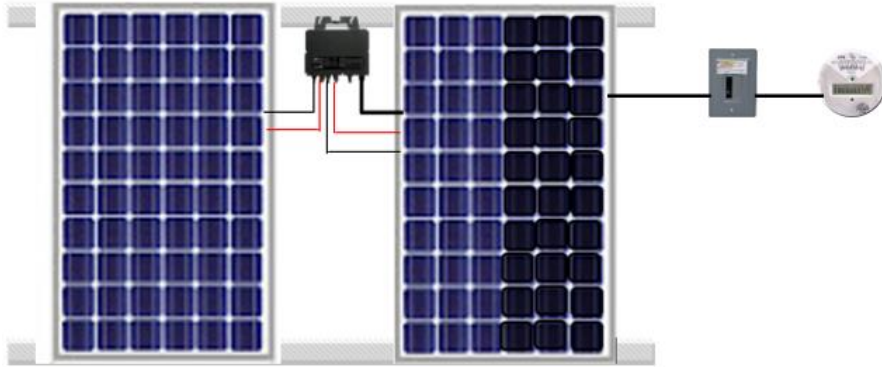


Ilustración 32. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la mitad de las celdas de uno de los módulos [Elaboración propia].

- Simulación de una mancha pequeña similar el excremento de aves.

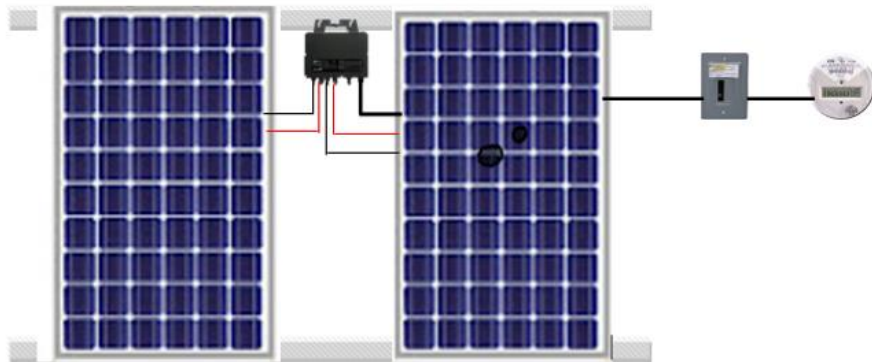


Ilustración 33. Sistema fotovoltaico interconectado a red con la sombra de una mancha simulando excremento de aves sobre uno de los módulos [Elaboración propia].

- Proyección de la sombra de una rama.

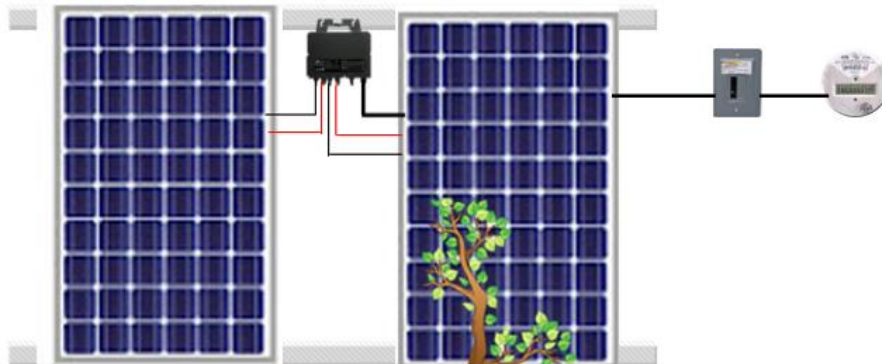


Ilustración 34. Sistema fotovoltaico interconectado a red con la sombra de una rama de árbol sobre uno de los módulos [Elaboración propia].

- III. Calcular la potencia de ambos módulos de acuerdo a la ecuación 2, utilizando los de los datos de voltaje a máxima potencia e intensidad de corriente a máxima potencia que se recabaron en las mediciones.
- IV. Calcular la eficiencia de ambos módulos de acuerdo a la ecuación 4, en donde el primer dato que se requiere es el factor de forma el cual se calcula con la ecuación 3, ya obtenido el factor de forma los demás datos que se utilizaron para el cálculo de la eficiencia son los valores registrados en las mediciones de: voltaje a máxima potencia, intensidad de corriente a máxima potencia y la radiación incidente del lugar donde se realizaron las pruebas.
- V. Elaboración en el programa OriginPro de las gráficas de: voltaje, intensidad de corriente y potencia de ambos módulos con los datos recabados en los puntos anteriores.
- VI. Análisis del efecto de las sombras en el sistema a través de los datos recabados y las gráficas realizadas.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se presenta los datos que se obtuvieron en el desarrollo del proyecto a partir de la realización de la metodología descrita en el capítulo anterior. Dichos datos recabados se plasmaron en gráficas para así hacer un mejor análisis y comprensión de los mismos.

Los resultados se obtuvieron a través de mediciones que constaban de una duración de 5 horas consecutivas por día, donde los datos de características eléctricas de los módulos fotovoltaicos se registraban en intervalos de 10 minutos, estas mediciones se realizaron para las dos distintas etapas. Derivado de las mediciones se logró registrar una base de datos distinta para cada una de las etapas, con las cuales se elaboraron diversas graficas significativas para el entendimiento del proyecto.

4.1. ETAPA I. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL EFECTO DE SOMBRAS EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DESCONECTADOS.

Del cumplimiento metodológico descrito en el apartado 3.2 del capítulo 3 del presente proyecto, se alcanzó de forma exitosa, en primer lugar, la construcción e instalación de la estructura metálica y los módulos fotovoltaicos (Ilustración 35).

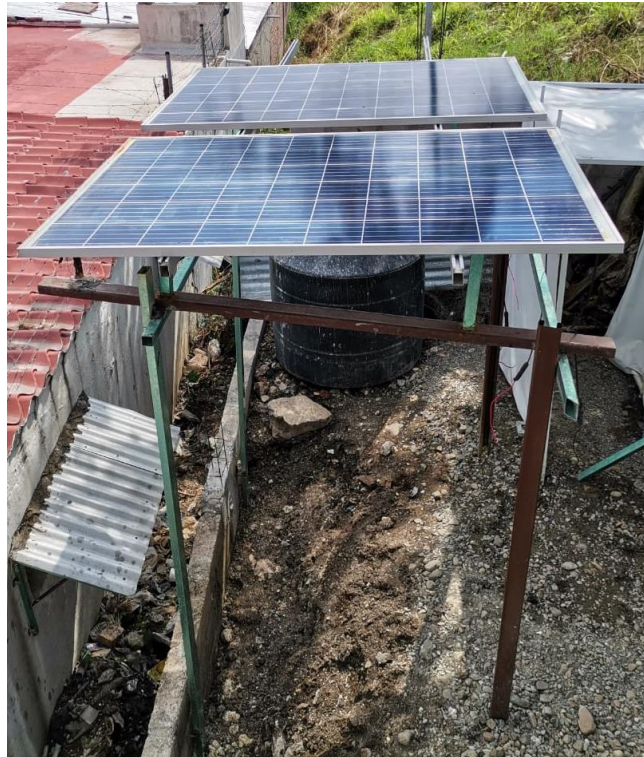


Ilustración 35. Módulos fotovoltaicos instalados.

Con los módulos fotovoltaicos ya instalados se procedió a realizar las mediciones descritas en el capítulo 3. Mediciones que iniciaron el mes de marzo y concluyeron a mediados del mes de mayo. Cada día que se realizaban mediciones se proyectaba una sombra diferente, con el propósito de determinar si cada diferente sombra impactaba de manera distinta el rendimiento del módulo fotovoltaico.

4.1.1. Cubrir una celda en diferentes puntos del módulo (esquinas superiores e inferiores).

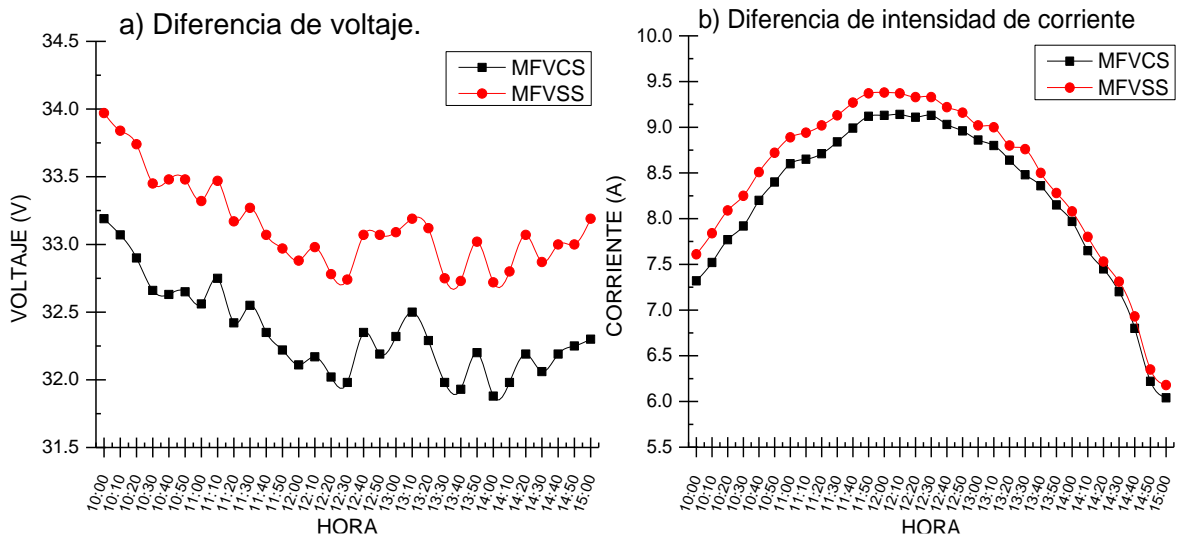
La primera evaluación consistió en el análisis del efecto de sombrear una celda de uno de los módulos fotovoltaicos instalados. Las mediciones se realizaron en cuatro días, cada día variaba la ubicación de la celda sombreada a evaluar, en este caso se eligió sombrear las celdas ubicadas en las esquinas del módulo como se propuso en la Ilustración 14.

A partir de estos cuatro días de mediciones se observó que el impacto en la producción de energía entregada del módulo fotovoltaico es de igual magnitud independientemente de la ubicación que tenga la celda donde incide la sombra. Conociendo esto, se decidió seleccionar los datos recabados de un solo día de las mediciones, el cual se eligió comparando los cuatro casos con esta sombra y observando en cuál de ellos se presentaron las mejores condiciones climáticas que proporcionaron los valores más representativos para el análisis.



Ilustración 36. Módulo fotovoltaico con sombra en la celda inferior derecha.

Las siguientes graficas pertenecen a la evaluación que se realizó con los módulos descritos previamente, donde en uno de ellos incide una sombra en la celda ubicada en la esquina inferior derecha, mientras que el otro módulo se encontraba completamente despejado (ilustración 36).



Gráfica 1a y Gráfica 1b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.

El efecto que se percibió en la evaluación fue de una disminución en los valores del voltaje y de la intensidad de corriente, efecto que se puede visualizar en las gráficas 1a y 1b respectivamente, donde la curva negra representa datos pertenecientes al módulo FV con sombra mientras que la curva roja pertenece al módulo FV que se mantuvo despejado.

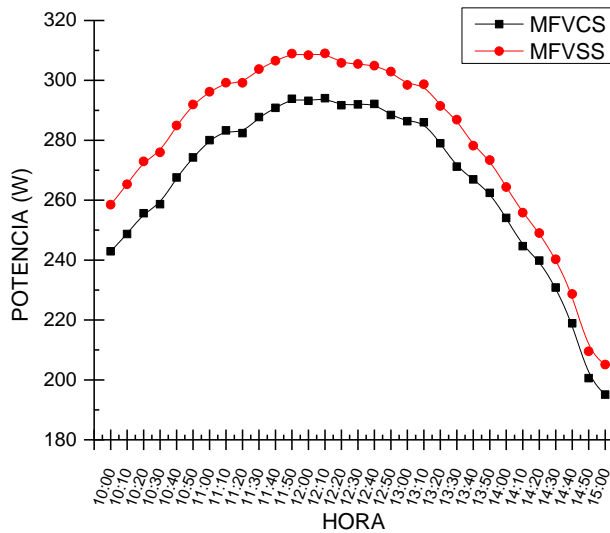
De acuerdo a la gráfica 1a los valores del voltaje a circuito abierto que entrega el módulo con sombra es menor a comparación del voltaje entregado por el módulo sin sombra, se puede inferir observando la gráfica que esta diferencia de voltaje entre un módulo y otro es inferior a 1V, variando el valor en el transcurso de las mediciones entre 0.7V a 0.8V.

Con lo que respecta a la gráfica 1b la cual describe el efecto percibido en los valores de intensidad de corriente a corto circuito de ambos módulos, efecto que al igual que en el caso del voltaje el módulo con la sombra presenta una intensidad de corriente inferior que la del módulo sin sombra, aunque tanto el voltaje y la intensidad de corriente sean menores en el módulo con la sombra, en la gráfica 1b se distingue como la diferencia de intensidad de corriente entre ambos módulos es de menor magnitud, es decir, el efecto que se tiene en el

módulo con sombra refiriéndose a la intensidad de corriente es de entre 0.3A a 0.1A inferior a la intensidad de corriente del módulo sin sombra.

Observando ambas gráficas (gráfica 1a y gráfica 1b) se comprende que bien en ambos casos los valores en el módulo con sombra son menores, pero en el caso del voltaje la diferencia de valores entre ambos módulos es proporcional, en otras palabras, si el voltaje del módulo sin sombra disminuye el voltaje del módulo con sombra disminuye también o si dado el caso el voltaje de módulo sin sombra llega a aumentar el voltaje del módulo con sombra del mismo modo aumentara siempre manteniendo la diferencia de 0.7V a 0.8V, mientras que en el caso de la intensidad de corriente se aprecia que si hay un aumento en la intensidad de corriente del módulo sin sombra también habrá un aumento en los valores del módulo con sombra pero la diferencia entre ambos será de mayor magnitud, por ejemplo tomando los primero datos de la gráfica 1b tenemos que a las 10:00 am se registró una intensidad de corriente en el módulo sin sombra de aproximadamente 7.6A y en el módulo con sombra una de 7.3A aproximadamente, asumiendo una diferencia de 0.3A, por otro lado cuando la intensidad de corriente del módulo sin sombra disminuye la intensidad de corriente de modulo con sombra no, de esta forma se reduce la diferencia de los valores, tomando los datos registrados a las 14:40 pm se sabe que la intensidad de corriente del módulo sin sombra fue de alrededor de 6.9A mientras que el módulo con sombra entrego una intensidad de corriente de 6.8A aproximadamente, indicando una diferencia mínima y por lo tanto un efecto muy poco significativo. Con esto se asume que mientras menor sea la radiación incidente la sombra en la celda no afectara de gran forma ya que a menor radiación menores serán los valores de intensidad de corriente por lo tanto menor será la diferencia de amperaje en los módulos.

Registrados los valores del voltaje y la intensidad de corriente de ambos módulos se elaboró el cálculo de la potencia empleando la ecuación 2 situada en el capítulo 2, obteniendo los datos de la potencia de ambos módulos se plasmaron en la gráfica 2 con la que podemos interpretar en términos de producción eléctrica cual fue el efecto se sombrear una celda de un módulo FV.



Gráfica 2. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.

La gráfica 2 muestra que en las horas donde se sabe que existe una mayor radiación solar el impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico que tiene una celda sombreada es considerable, teniendo pérdidas de 18W aproximadamente, mientras que en las horas con menor radiación solar hay perdidas de alrededor de 10W.

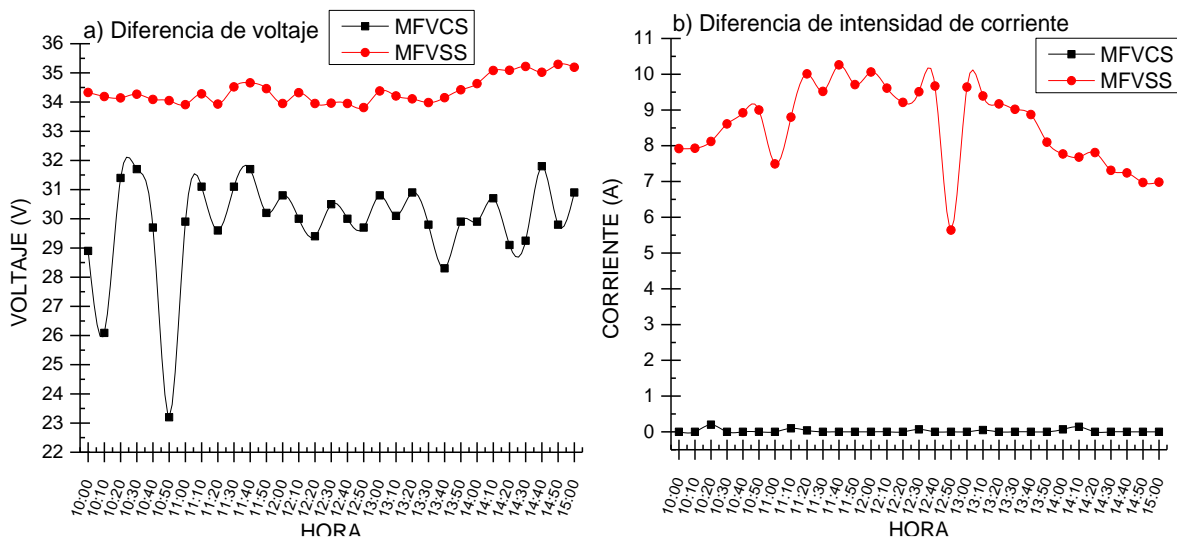
4.1.2. Cubrir una línea de celdas del módulo FV de forma horizontal.

Para esta evaluación se sombrea la línea de celdas de forma horizontal ubicada en la parte superior del módulo FV.



Ilustración 37. Módulo fotovoltaico con sombra en la línea horizontal superior de celdas.

Con los datos obtenidos de las mediciones del módulo fotovoltaico con sombra y del módulo fotovoltaico sin sombra se generaron las siguientes gráficas.



Gráfica 3a y Gráfica 3b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear una línea de celdas de forma horizontal.

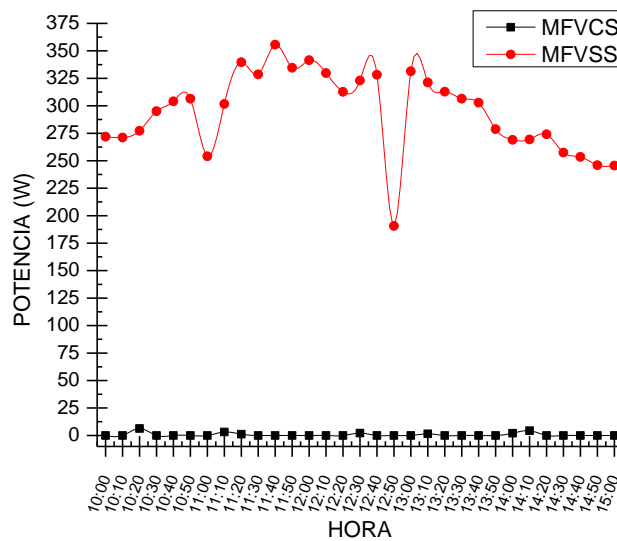
De la gráfica 3a se observa que existe una diferencia en el voltaje de ambos módulos, hallándose inferiores los valores entregados del módulo con sombra, siendo de 3V a 6V menos que el voltaje del módulo sin sombra, e incluso en dos ocasiones se registraron valores con una diferencia mayor a los 6V, valores que corresponden a la medición de las 10:10 am donde el módulo con sombra entrego 26V aproximadamente mientras que el módulo sin sombra entrego cerca de 34V presentando una disminución en el voltaje del módulo con sombra de alrededor de 8V; por otra parte a las 10:50 am se registró la diferencia más amplia, observando un voltaje de alrededor de 23V del módulo con sombra y de 34V aproximadamente en el módulo sin sombra determinando una diferencia de cerca de 11V. Aunque en ambos módulos el voltaje es cambiante, en el caso del módulo sin sombra los valores varían de forma mesurada, es decir que, aunque en algunos momentos incidiera menor radiación solar que en otras la alteración del voltaje no sería extrema, a comparación de lo ocurrido con el voltaje del módulo con sombra donde la variación de voltaje es drástica.

El efecto en la intensidad de corriente se expone en la gráfica 3b, donde se destaca que los valores registrados del módulo con sombra están ligeramente por encima de los 0A o exactamente en los 0A, entendiendo que al sombrear una línea horizontal de celdas de un módulo FV dicha sombra no permite la circulación de carga eléctrica dentro del módulo por lo que la entrega de intensidad de corriente es prácticamente nula.

Independiente a los valores interpretados del módulo con sombra existe otra observación destacable relacionada con el voltaje y la intensidad de corriente del módulo sin sombra. Analizando las curvas del módulo sin sombra tanto la curva de voltaje (gráfica 3a) como la de intensidad de corriente (gráfica 3b) se puede comprender que el módulo utilizado en este proyecto tiene un sistema de compensación por así decirlo, explicado de forma más específica, se observó que el módulo al operar en un ambiente despejado donde en momentos incida una baja radiación solar este en lugar de entregar valores bajos tanto en el voltaje como en la intensidad de corriente, el módulo procede a solo disminuir los valores de una sola característica eléctrica mientras que la otra tiene a conservarse con un valor algo elevado, esto con el fin de aminorar las perdidas en la producción de energía, ya que si ambos valores son bajos la energía producida descendería. En este caso se percibe que la intensidad de

corriente es la que sufre una mayor variación bajando y subiendo sus valores de forma notable y por esto el voltaje permanece con valores altos y con variaciones no tan exageradas compensando de esta forma cualquier valor en la intensidad de corriente ya sea alto o bajo.

Una vez recabados y analizados los datos del voltaje y corriente el paso a seguir en todos los casos siempre será calcular la potencia entregada de ambos módulos y representarla en una gráfica para así analizar la producción de energía de cada módulo haciendo énfasis en la magnitud en que la sombra afecto el funcionamiento del módulo donde se proyectó.



Gráfica 4. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear una línea de celdas de forma horizontal.

La grafica 4 muestra que sombrear toda una línea horizontal de celdas del módulo impacta de tal manera que la producción de energía en el módulo con esta sombra es nula, esto se debe que al no circular una carga eléctrica dentro del módulo los valores de intensidad de corriente sean de 0A como ya antes se mencionó, y el resultado de registrar una intensidad de corriente de 0A es que la producción de energía del módulo es de 0W. Comprendiendo a su vez que el módulo al no producir energía su eficiencia correspondería a 0.

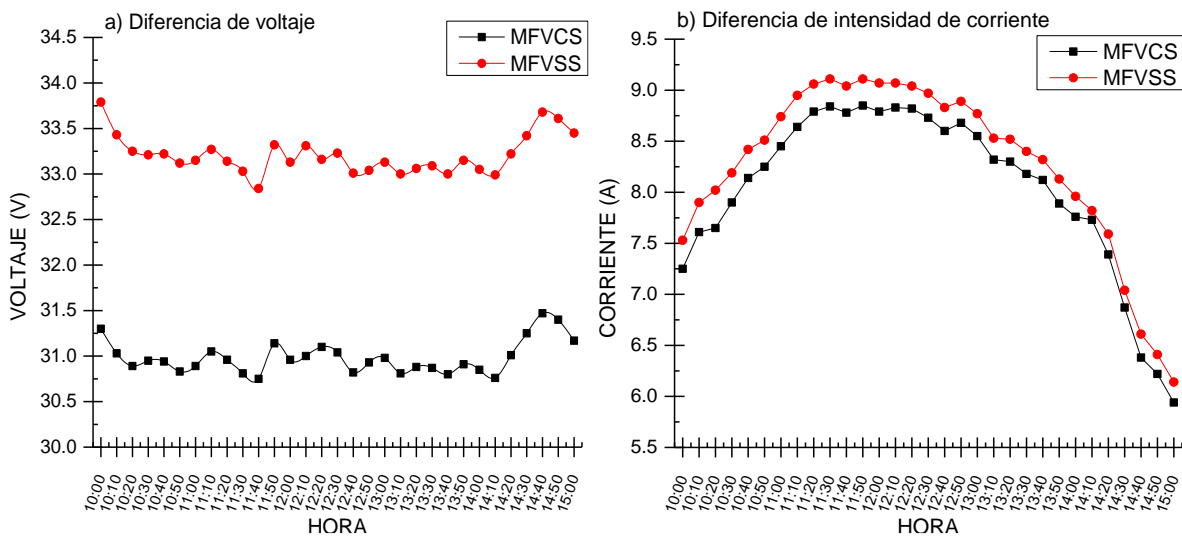
4.1.3. Cubrir una línea de celdas del módulo FV de forma vertical (línea vertical de celdas del extremo derecho e izquierdo).

Se hicieron dos evaluaciones con esta sombra, una evaluación fue con la sombra en la línea de celdas de forma vertical del extremo izquierdo y la otra con la sombra en la línea de celdas de forma vertical del extremo derecho del módulo (ilustración 16), se observó que en ambos casos los resultados eran similares, por lo cual, de estas dos evaluaciones se seleccionó aquella en la cual hubo una mejor condición climática permitiendo un mejor rendimiento en los módulos.



Ilustración 38. Módulo Fotovoltaico con sombra en la línea vertical de celdas del extremo izquierdo.

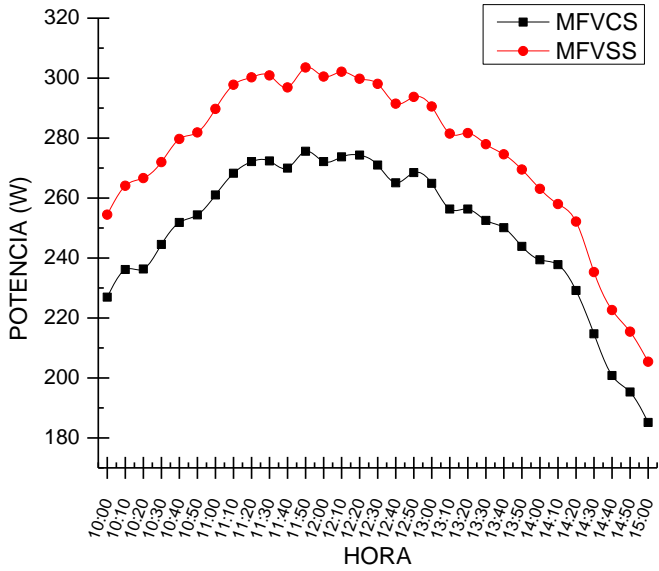
Las siguientes graficas pertenecen a las mediciones donde se proyectó la sombra sobre una línea de celdas de forma vertical del extremo izquierdo del módulo (ilustración 38).



Gráfica 5a y Gráfica 5b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear una línea de celdas de forma vertical.

Las gráficas 5a y 5b muestran que en esta evaluación la diferencia de valores en el voltaje de ambos módulos es un poco más de los 2V y en el caso de los datos de la intensidad de corriente se observa una diferencia de alrededor de 0.3A a 0.4A, donde los datos inferiores son los del módulo con la sombra.

Con esta evaluación también se demuestra que cuando la radiación solar tiende a disminuir el módulo sin sombra opera de tal forma donde el voltaje no desciende en gran medida mientras que la intensidad de corriente es la que más disminuye dando le paso a que la diferencia de valores en la intensidad de corriente del módulo sin sombra y el módulo con sombra sea menor a en otros momentos, observación que ya se había señalado en las primeras evaluaciones con la sombra en una sola celda. Esta diferencia en los valores de intensidad de corriente es de menos de 0.2A siendo inferiores siempre los valores del módulo con sombra.



Gráfica 6. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear una línea de celdas de forma vertical.

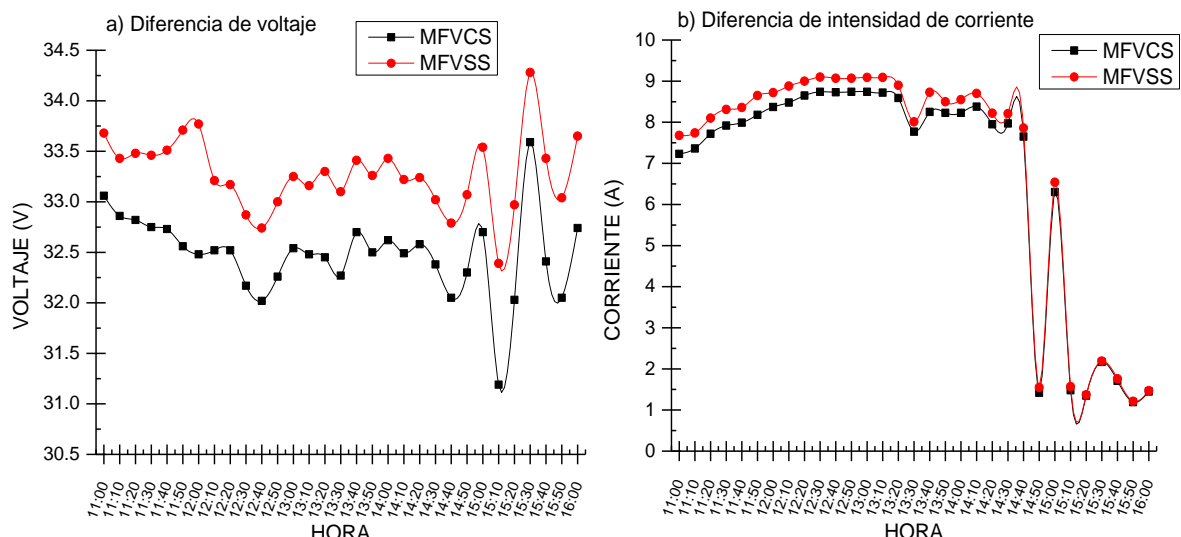
Comparando las curvas de potencia de ambos módulos se observa que la producción de energía entregada por el módulo con sombra es inferior por un rango de 20W a 28W en relación a la producción de energía entregada por el módulo sin sombra.

4.1.4. Proyección de una línea simulando un cable.



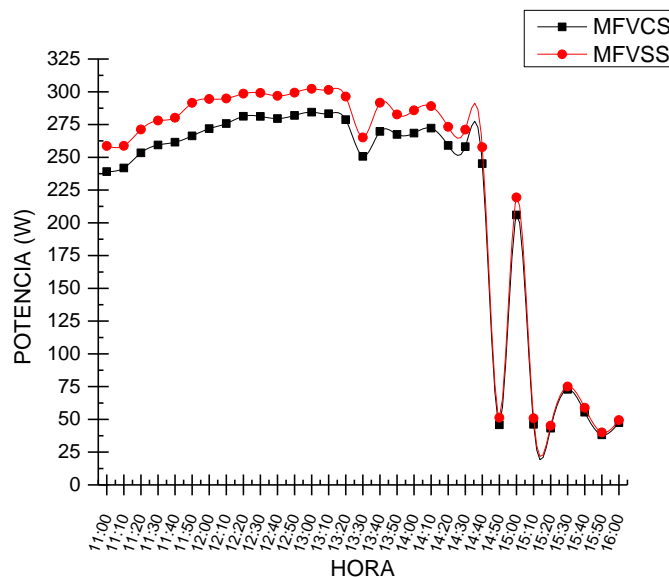
Ilustración 39. Módulo Fotovoltaico con sombra de un cable.

El impacto de la proyección de la sombra de un cable sobre un módulo (ilustración 39), es de una disminución en el voltaje dentro de un rango de 0.6V a 0.8V y en la intensidad de corriente de 0.4A con la excepción de los momentos en donde la radiación solar incidente es menor causando que la intensidad de corriente en el módulo con sombra disminuya menos de 0.1A, valor prácticamente despreciable al ser mínima la variación con relación a los valores del módulo sin sombra.



Gráfica 7a y Gráfica 7b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al proyectar una sombra simulando un cable.

Se tomaron los datos pertenecientes a las mediciones de la 12:30 pm donde se captó la mayor radiación solar, en esta medición se obtuvieron valores por parte del módulo sin sombra de 32.8V y 9.1A mientras que en el módulo con sombra se obtuvieron los datos de 32.1V y 8.7A siendo estos valores inferiores por 0.8V y 0.4A con respecto a los valores obtenidos de módulo sin sombra. Por otra parte, tomando los datos de la medición con la menor radiación solar incidente correspondiente al horario de 15:50 pm, donde el módulo sin sombra entrego 33V y 1.21A mientras que el módulo con sombra entrego 32V y 1.19A siendo estas últimas inferiores por 1V y 0.02A, observándose que en el caso donde la radiación solar es menor la diferencia en el voltaje entre ambos módulos es un poco mayor mientras que en la intensidad de corriente prácticamente es ninguna.



Gráfica 8. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al proyectar una sombra simulando un cable.

La diferencia de la producción de energía entre ambos módulos se expresa en la gráfica 8 donde se observa el rango de variación entre la potencia entregada de ambos módulos va de 18W a 25W, exceptuando las mediciones pertenecientes en los momentos donde incidió menor radiación existiendo una diferencia de apenas 5W o menos, recalcando que los valores el módulo con sombra siempre serán los inferiores con respecto a los valores del módulo sin sombra.

Retomando los datos de la medición de las 12:30 pm tenemos que con lo que respecta a la potencia el módulo sin sombra entrego alrededor de 300W y el módulo con sombra entrego cerca de 280W siendo inferior esta última por 20W. Por otra parte en la medición de las 15:50 pm el módulo sin sombra entrego cerca de 40W y el módulo con sombra 38W aproximadamente, contando con una diferencia de apenas 2W.

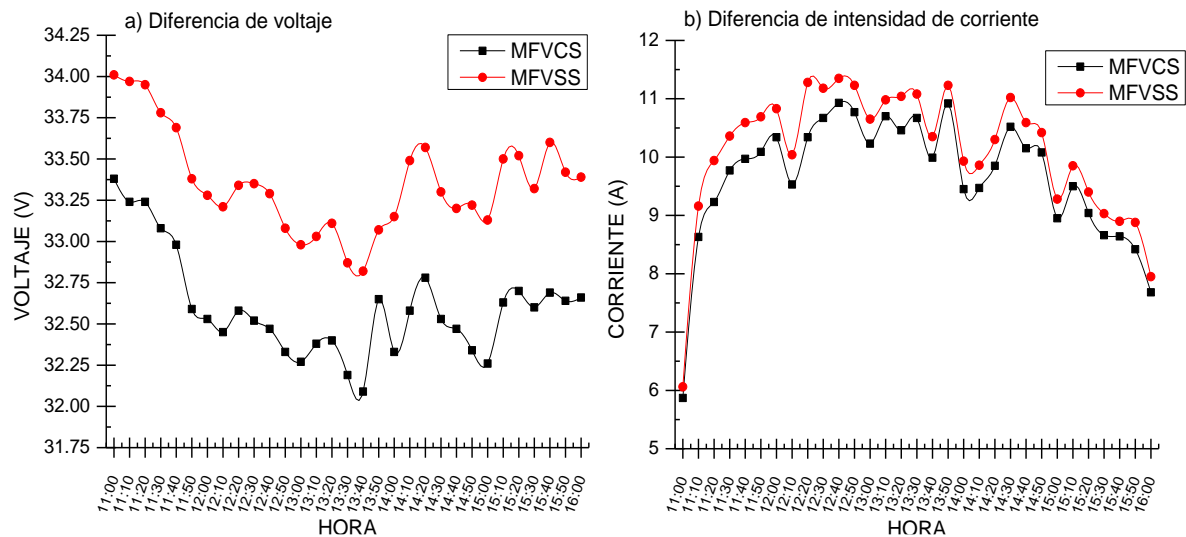
4.1.5. Proyección de una sombra simulando una varilla o tubo.

Esta evaluación consistió en proyectar sobre uno de los módulos una sombra simulando una varilla o tubo, mientras el otro módulo se encontraba despejado como se muestra en la siguiente imagen.



Ilustración 40. Módulo Fotovoltaico con sombra de una varilla o tubo.

De las mediciones de esta evaluación se obtuvieron las siguientes gráficas:

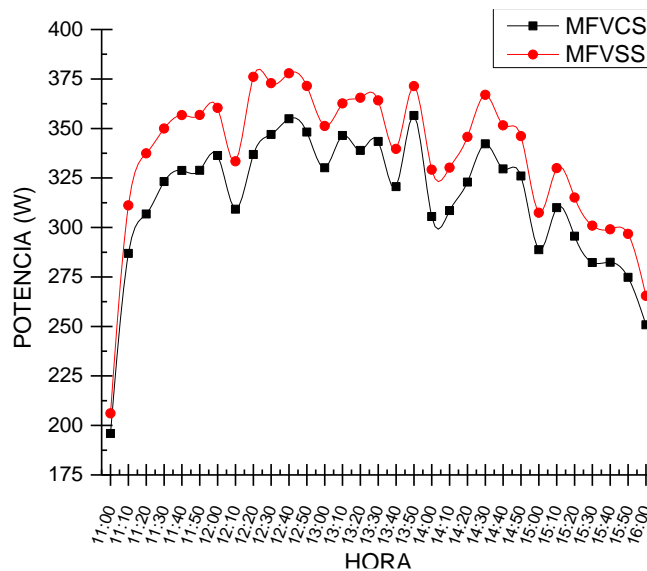


Gráfica 9a y Gráfica 9b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al proyectar una sombra simulando una varilla o tubo.

El voltaje registrado de ambos módulos se ilustra en la gráfica 9a, en la que se distingue que el voltaje perteneciente al módulo con sombra fue inferior por un rango de 0.7V a 0.9V con

respecto al voltaje que entrego el módulo sin sombra, incluso se llegó a captar una diferencia de apenas 0.5V aproximadamente, la cual corresponde a la medición registrada a las 13:50 pm donde el módulo con sombra entrego 32.65V y el módulo sin sombra 33.1V, por otra parte, la diferencia más amplia entre ambos voltajes fue de alrededor de 1V, esta diferencia se registró a las 15:40 pm en donde el módulo con sombra y el módulo sin sombra registraron valores de 32.6V y 33.6V respectivamente.

Los valores de la intensidad de corriente se observan en la gráfica 9b con la cual se puede señalar que el módulo con sombra entrego una intensidad de corriente inferior a la del módulo sin sombra siendo la diferencia de 0.3A a 0.8A, la diferencia más baja perteneciendo a los momentos donde incidió una menor radiación, incluso la diferencia llego a ser de apenas 0.2A la cual se observó en la primera medición a las 11:00 am.



Gráfica 10. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al proyectar una sombra simulando una varilla o tubo.

En cuanto el impacto en la producción de energía se percibe que a lo largo del día en general la pérdida de producción de energía del módulo es de alrededor de 20W a 30W, aunque, se observó que, en el peor de los caso el módulo con sombra puede llegar a producir hasta aproximadamente 40W menos que un módulo sin sombra, en el caso contrario se observó que la menor perdida de energía es de apenas entre 10W y 15W.

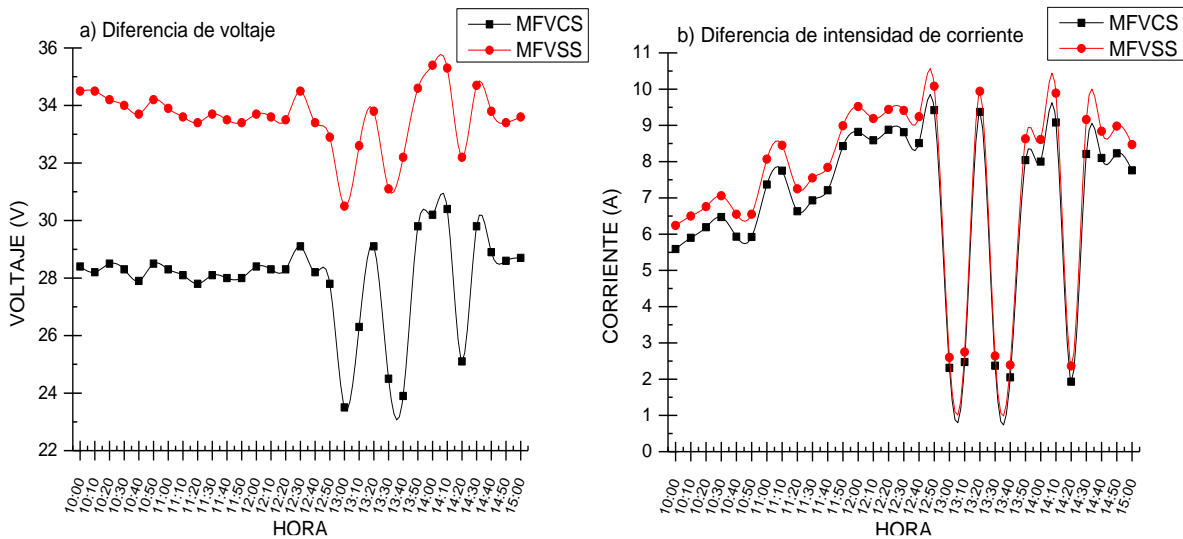
4.1.6. Cubrir la mitad del módulo.

Se cubrió la mitad de celdas de uno de los módulos fotovoltaicos, manteniendo el otro módulo despejado como se muestra en la ilustración 41.



Ilustración 41. Módulo Fotovoltaico con la mitad de sus celdas cubiertas.

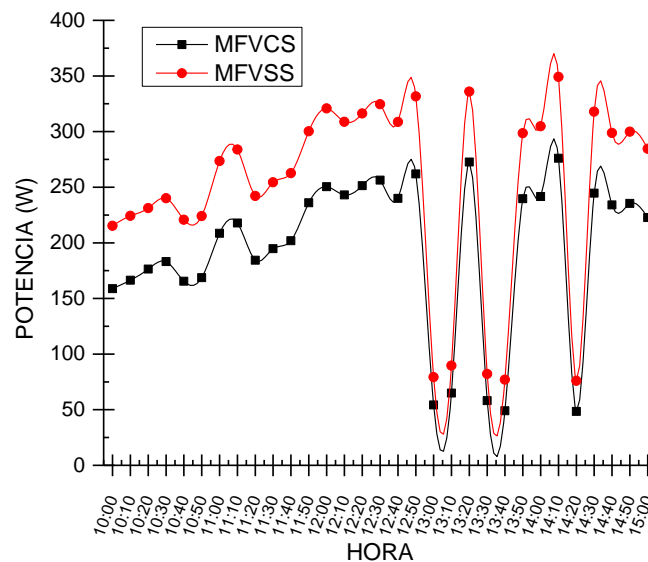
Con esta sombra al igual que con las sombras anteriores se analizó el impacto en las características eléctricas del módulo con la sombra comparandolas a las características eléctricas del módulo sin la sombra, datos que se obtuvieron de mediciones y se plasmaron en las siguientes graficas.



Gráfica 11a y Gráfica 11b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear la mitad del módulo.

El funcionamiento del módulo con sombra se vio afectado de tal forma que el voltaje e intensidad de corriente entregados por este es menor en comparación a los valores que entrego el módulo sin sombra; entregando el módulo con sombra en la mayor parte del día de 5V a 6V y de 0.6A a 0.7A menos que lo que entrego el módulo sin sombra.

No obstante, se presentaron momentos en donde la diferencia en el voltaje de ambos aumentó, pero la diferencia en la intensidad de corriente se acorto, esto ocurrió en la medición de la 13:40 pm donde el módulo con sombra entrego aproximadamente 24V y 2A, mientras el módulo sin sombra entrego cerca de 32V y 2.4A siendo la diferencia de 8V y 0.4A. Por otra parte, la diferencia más amplia en lo que respecta a la intensidad de corriente se registró a las 14:30 pm en donde el módulo sin sombra entrego alrededor de 34.7V y 9.1A, mientras que el módulo con sombra entrego aproximadamente 29.8V y 8.2A siendo inferiores estos últimos 2 valores por cerca de 0.5V y 0.9A.



Gráfica 12. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear la mitad del módulo.

En lo que concierne a la producción de energía se comprende de acuerdo a la gráfica 12 que el módulo con sombra genera de 50W a 70W menos que el módulo sin sombra, incluso se presentaron momentos donde la producción de energía del módulo con sombra fue de 24W a 28W menos que la generada por el módulo sin sombra.

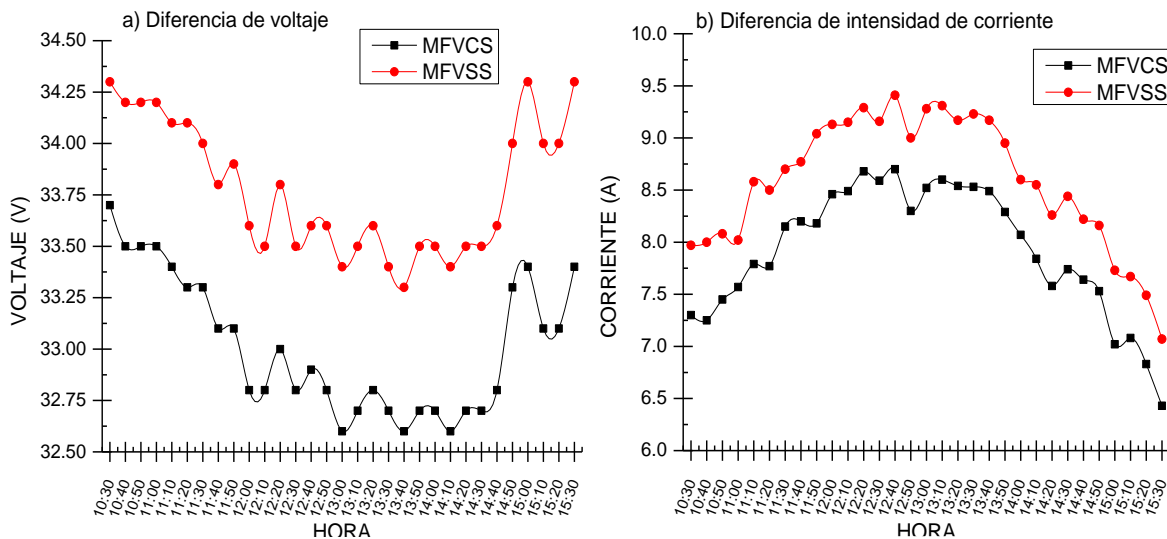
4.1.7. Simulación de una mancha pequeña similar el excremento de aves.

El excremento de aves es uno de los elementos mas comunes que llegan a ensuciar los módulos fotovoltaicos, las manchas del excremento de aves llega a ensombrecer una o mas celdas del módulo como se puede observar en la ilustración 42.



Ilustración 42. Módulo Fotovoltaico con la sombra del excremento de aves.

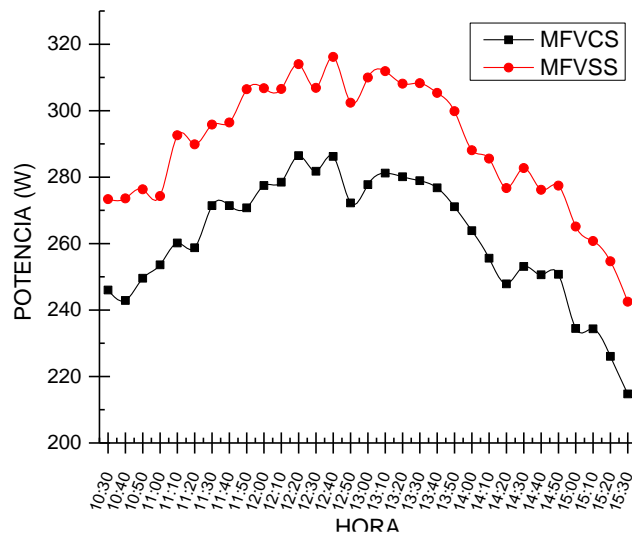
En las gráficas 13a y 13b se muestra como el voltaje e intensidad de corriente que entrega un módulo fotovoltaico se ven afectados cuando este se encuentra manchado por excremento de aves.



Gráfica 13a y Gráfica 13b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al simular la sombra del excremento de aves.

De acuerdo a la gráfica 13a el voltaje que entrega el módulo con sombra comparado al que entrega el módulo sin sombra es de 0.6V a 0.9V menos, observando que la diferencia de voltaje más amplia se presentó en la última media hora de mediciones, es decir que, de 15:00 pm a 15:30 pm el voltaje del módulo con sombra fue inferior por 0.9V con respecto al voltaje del módulo sin sombra.

Por otra parte, en la gráfica 13b se observa que la intensidad de corriente que el módulo con sombra entregó de 0.6A a 0.8A menos comparado al entregado por el módulo sin sombra.



Gráfica 14. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al simular la sombra del excremento de aves.

En cuanto a la producción de energía, la gráfica 14 muestra como el módulo con sombra entrega menos energía que el módulo sin sombra, existiendo una pérdida de 20W a 35W por parte del módulo con sombra, la menor pérdida se registró en la medición de las 11:00 am donde el módulo con sombra entrego cerca de 255W mientras que el módulo sin sombra entrego 275W aproximadamente, percibiendo una diferencia de 20W, en el caso contrario la mayor pérdida de producción de energía se registró a las 11:50 am donde el módulo con sombra entrego al rededor 270W y el módulo sin sombra entrego aproximadamente 305W, produciendo cerca de 35W menos el módulo con la sombra.

Teniendo en cuenta el efecto de las sombras anteriores y comparándolo con este se llega a captar que los resultados pertenecientes a las mediciones con la sombra de un cable (apartado 4.1.5) y los resultados de las mediciones con la mancha del excremento de aves es parecida por lo cual se infiere que la incidencia tanto la sombra de un cable y la mancha de excremento de aves sobre un módulo fotovoltaico alcanzan a tener el mismo impacto sobre la producción de energía de este.

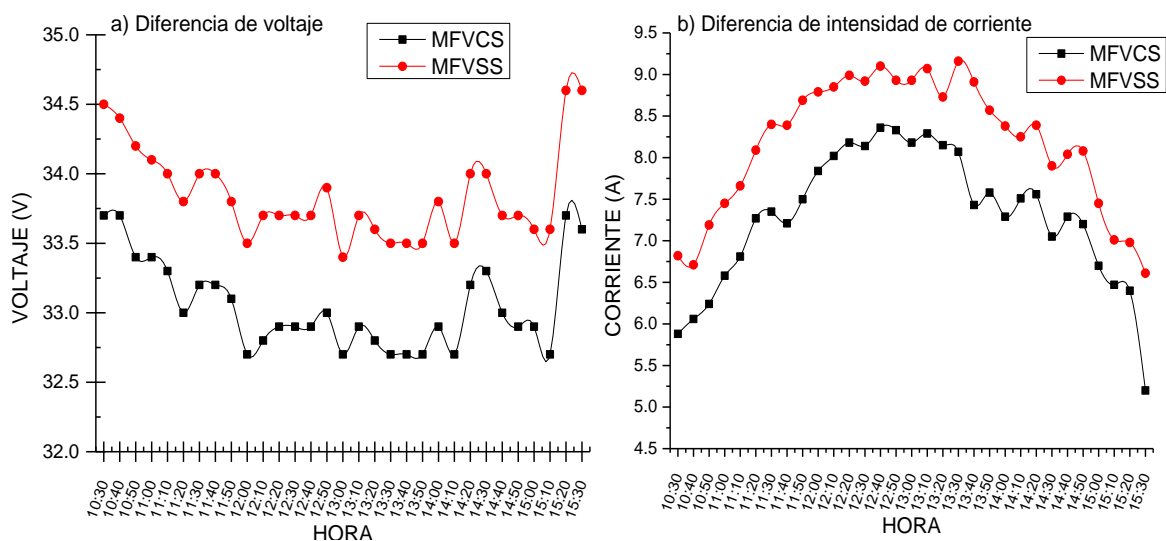
4.1.8. Proyección de la sombra de una rama.

Esta ultima evaluación de la primer etapa de mediciones del proyecto consitió en el analisis del efecto de la incidencia de una de las sombras mas comunes que se puede presentar sobre los módulos fotovoltaicos la cual es la sombra de una rama de arbol.



Ilustración 43. Módulo Fotovoltaico con la sombra de una rama.

A partir de la proyección de esta sombra como se muestra en la ilustración 43, se obtuvieron los datos que se presentan en las siguientes gráficas.



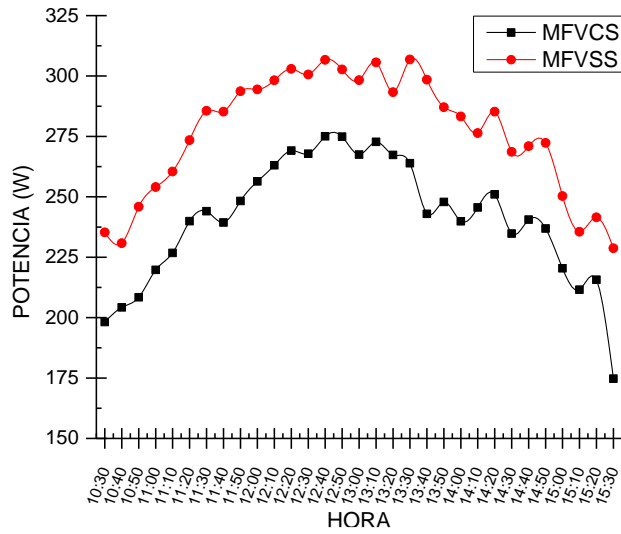
Gráfica 15a y Gráfica 15b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al proyectar sobre él la sombra de una rama.

Las gráficas 15a y 15b muestran como el módulo con sombra entrega valores inferiores tanto en el voltaje como en la intensidad de corriente comparándolos con los que entrego el módulo sin sombra.

En el caso del voltaje del módulo con sombra se percibe un descenso de 0.7V a 0.9V, e incluso se registró hasta un descenso de 1V en la medición perteneciente a las 15:30 pm, donde el módulo con sombra entrego 33.6V y el módulo sin sombra entrego 34.6V. Estos datos se pueden corroborar en la gráfica 15a.

Por su parte, a lo que respecta, a la intensidad de corriente entregada por los módulos a través de esta evaluación, se percibe que el efecto de la sombra sobre uno de los módulos es de una disminución de 0.6A a 1A, presentándose ocasiones en donde la disminución de los valores de la intensidad de corriente es mayor a 1A, siendo el caso del registro de datos pertenecientes a las mediciones de la 13:40 pm y de las 15:30 pm, donde el módulo sin sombra entrego 8.9A y 6.6A, mientras el módulo con sombra entrego 7.4A y 5.2A, reconociendo una diferencia de 1.5A y 1.4A respectivamente. En el caso del registro perteneciente a las 15:30 pm coincidió que la diferencia de ambos valores (tanto el valor del voltaje como el de la corriente) es la más amplia en relación a los valores entregados por el módulo sin sombra. En el caso contrario, se presentó una diferencia entre la intensidad de corriente de ambos módulos de 0.5A, diferencia que se asumió en la medición correspondiente a las 15:10 pm, donde la intensidad de corriente entregada por el módulo con sombra que fue de 6.5A y la del módulo sin sombra de 7A.

Refiriéndose a términos de producción de energía, el efecto de la sombra de la rama de un árbol sobre un módulo fotovoltaico, representa una pérdida de energía de 24W en el mejor de los casos, y, por el contrario, en el peor de los casos la incidencia de esta sombra ocasiona pérdidas de hasta 56W.



Gráfica 16. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al proyectar sobre él la sombra de una rama.

Las pérdidas en la producción de energía mencionadas anteriormente, se registraron en las mediciones de las 13:40 pm y 15:10 pm; en la primera el módulo sombreado entregó aproximadamente 242W, mientras que, el módulo sin sombra entregó alrededor de 298W, estableciendo una pérdida de 56W; por otro lado, en el segundo horario mencionado, el módulo con sombra entregó 212W aproximadamente, a la vez que, el módulo sin sombra entregaba alrededor de 236W, determinando una pérdida de 24W (ver gráfica 16).

4.2. ETAPA II. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL EFECTO DE SOMBRAS EN UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A RED.

En este apartado del resultado se presenta la información sobre el efecto de las diferentes sombras a estudiar, mencionadas con anterioridad, aplicadas en un sistema fotovoltaico interconectado a red. Al tratarse de un sistema conectado con un microinversor el efecto de las sombras sobre uno de los módulos no perjudica el rendimiento del otro módulo del sistema que se encuentra despejado de cualquier obstáculo, de esta forma, se reducen las pérdidas de producción de energía del sistema.

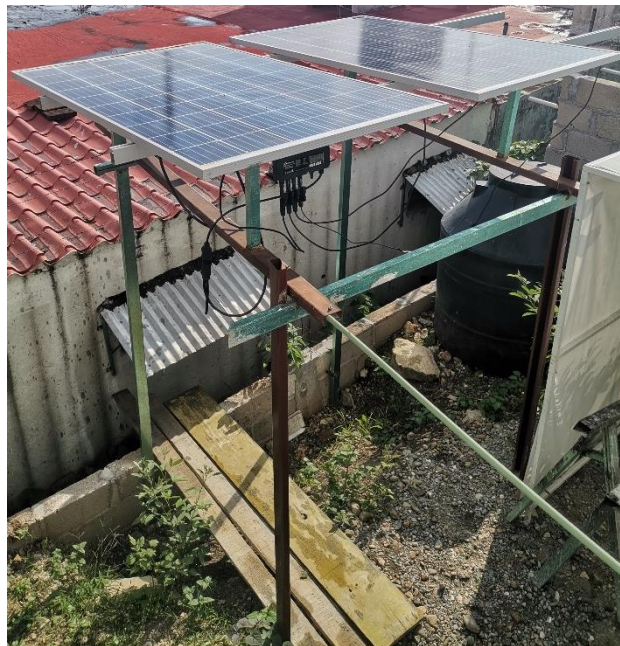


Ilustración 44. Sistema interconectado a red con microinversor.

Los resultados de esta etapa se recabaron midiendo las características eléctricas a máxima potencia que los módulos entregaban al microinversor, para esto se tuvo que implementar conectores mc4 tipo Y para cada módulo (procedimiento que no se contemplaba en la metodología del proyecto), de esta forma, al conectar los módulos al microinversor con los

mc4 tipo Y se disponía de una entrada del conector que permitió hacer las mediciones pertinentes, de los valores entregados por cada módulo al microinversor (ver ilustración 58 del Anexo 1).

Las pruebas experimentales correspondientes al análisis de este apartado se realizaron durante el mes de noviembre.

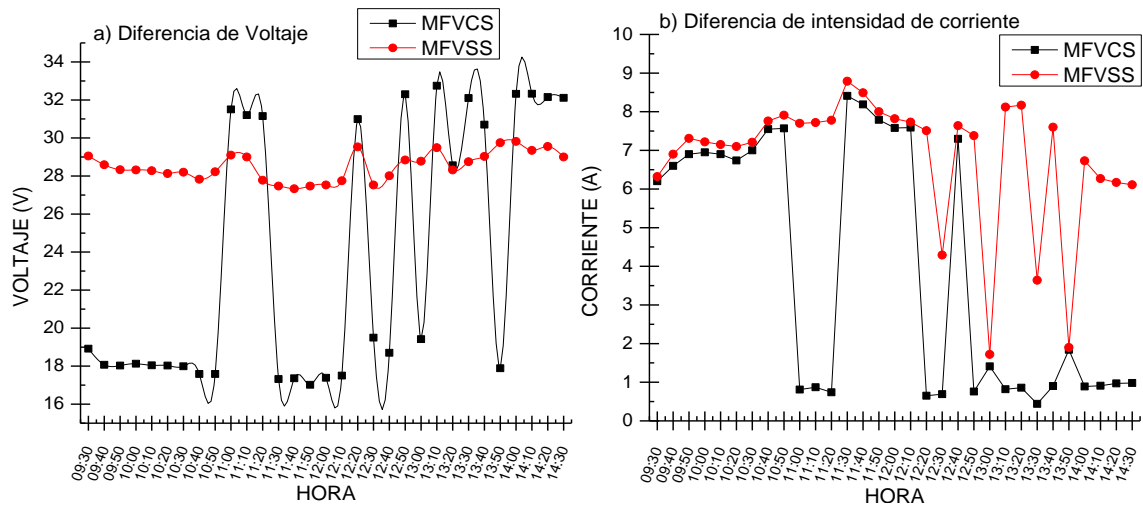
4.2.1. Cubrir una celda en diferentes puntos del módulo (esquinas superiores e inferiores).

La evaluación del efecto del sombreado de una celda sobre uno de los módulos del sistema interconectado a red (Ilustración 45), demuestra que, aun cuando los módulos se encuentran conectados entre sí, el rendimiento de uno de ellos no interfiere en el del otro módulo, esto se retribuye al funcionamiento del microinversor, que mantiene de forma independiente la producción de cada módulo.



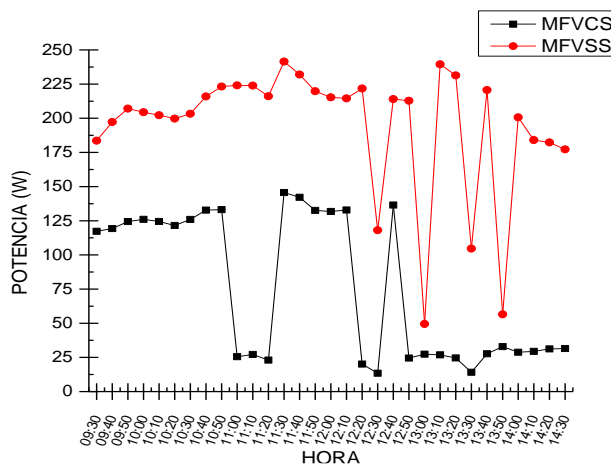
Ilustración 45. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en una celda de uno de los módulos del sistema.

El voltaje e intensidad de corriente a máxima potencia entregados por el módulo con sombra fueron inferiores a los del módulo sin sombra, al igual que sucedió en el caso de la etapa 1, con la particularidad que los módulos al estar conectados al microinversor, la diferencia de entrega del voltaje entre un módulo y otro se amplió, es decir, el módulo con sombra en vez de entregar valores inferiores por 0.9V al de módulo sin sombra como sucedió en la etapa 1, en esta etapa se registró que el módulo con sombra entrega entre 8V a 11V menos. Aunque la diferencia de los valores de intensidad de corriente se mantiene en el rango de 0.1A a 0.4A.



Gráfica 17a y Gráfica 17b. Impacto en las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre una de sus celdas.

Durante esta prueba experimental destaco la forma y magnitud en que los valores entregados por el módulo con sombra variaron en ocasiones de forma radical. Por ejemplo, de 11:00 am a 11:20 am el voltaje del módulo con sombra incrementa en gran magnitud comparado al que voltaje que estuvo entregando en las mediciones antes de esta hora, pasando de entregar alrededor de 17V, a entregar más de 31V, sobrepasando el voltaje que entrego el módulo sin sombra. Por lo contrario, la intensidad de corriente entregada por el módulo con sombra, en este horario en este horario, descendió en gran cantidad, entregando menos de 1A. Esta anomalía en el rendimiento del módulo con sombra se le atribuye al funcionamiento del microinversor.



Gráfica 18. Impacto en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre una de sus celdas.

Durante la prueba experimenta el módulo con sombra registro perdidas en su producción de energía de 60W a 90W. Sin embargo, debido a las irregularidades en la entrega del voltaje e intensidad de corriente del módulo con sombra, las pérdidas en su producción de energía de incrementaron, registrando pérdidas de hasta 200W.

4.2.2. Cubrir una línea de celdas del módulo FV de forma horizontal.

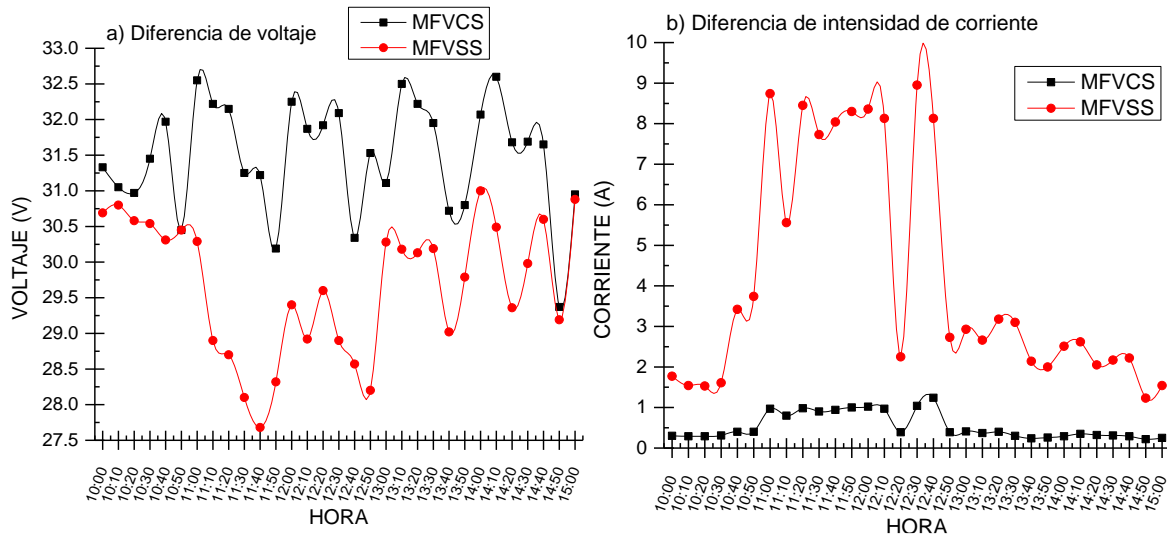
Al sombrear una línea de celdas de forma horizontal en uno de los módulos que conforman el sistema fotovoltaico interconectado a red (ilustración 46), se obtuvo un efecto distinto a cuando se realizó esta proyección en el módulo desconectado. En ambos casos el módulo con la sombra entrega una menor producción de energía que el módulo sin sombra, sin embargo, la diferencia del efecto en ambos casos radica en el comportamiento del voltaje que entrega el módulo con la sombra.



Ilustración 46. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la línea superior de celdas de uno de los módulos del sistema.

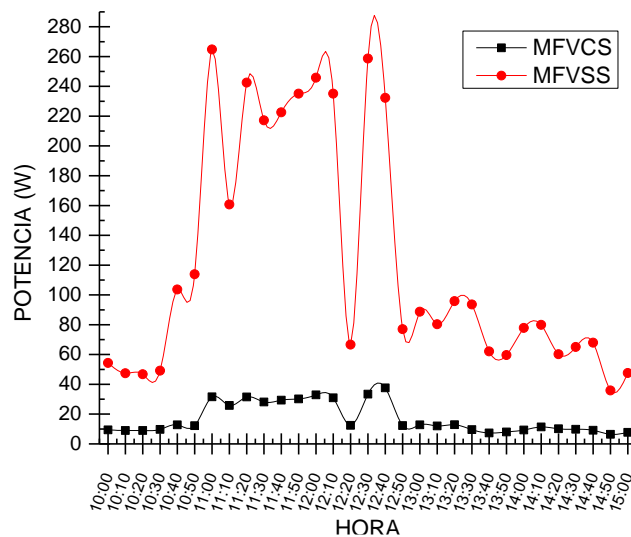
El voltaje que entrega el módulo con sombra resulta ser mayor que el voltaje del módulo sin sombra, registrando valores pertenecientes al módulo con sombra de 1V a 3.5V por encima del voltaje del módulo sin sombra, exceptuando los periodos donde la radiación solar disminuye, en este escenario los voltajes de ambos módulos prácticamente se igualan.

Al proyectar esta sombra sobre el módulo fotovoltaico se interrumpe el flujo de energía, causando que el módulo con sombra entregue una intensidad de corriente cercana o igual a cero, como se indicó anteriormente en el apartado 4.2. No obstante, al tener la conexión de los módulos al microinversor, el módulo con sombra llega a entregar una intensidad de corriente de 1A o valores cercanos a 1A.



Gráfica 19a y Gráfica 19b. Impacto en las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre la línea superior de celdas.

El aumento de voltaje entregado por el módulo con sombra se le atribuye a la implementación del microinversor, ya que, este al captar la depreciación en los valores de la intensidad de corriente busca compensarlos aumentando el voltaje, para disminuir las pérdidas energéticas de todo el sistema fotovoltaico. Además de esta compensación, se observa que el microinversor en ciertos periodos logra aumentar la intensidad de corriente entregada por el módulo con sombra, disipando el efecto de sombreado sobre este.



Gráfica 20. Impacto en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre la línea superior de celdas.

Se determinó que, en el mejor de los escenarios con la proyección de esta sombra, la menor pérdida de producción energética fue de 29W aproximadamente, la cual, se registró en los periodos donde la incidencia de radiación disminuye; por lo contrario, la mayor pérdida de producción de energía es de más de 230W.

Aun cuando, el microinversor procuro compensar las pérdidas por el efecto sombra, la mayor producción de energía entregada por el módulo con sombra fue de 37.6W, mientras el módulo sin sombra entrego 232W, comprendiendo una pérdida de energía de aproximadamente 194W.

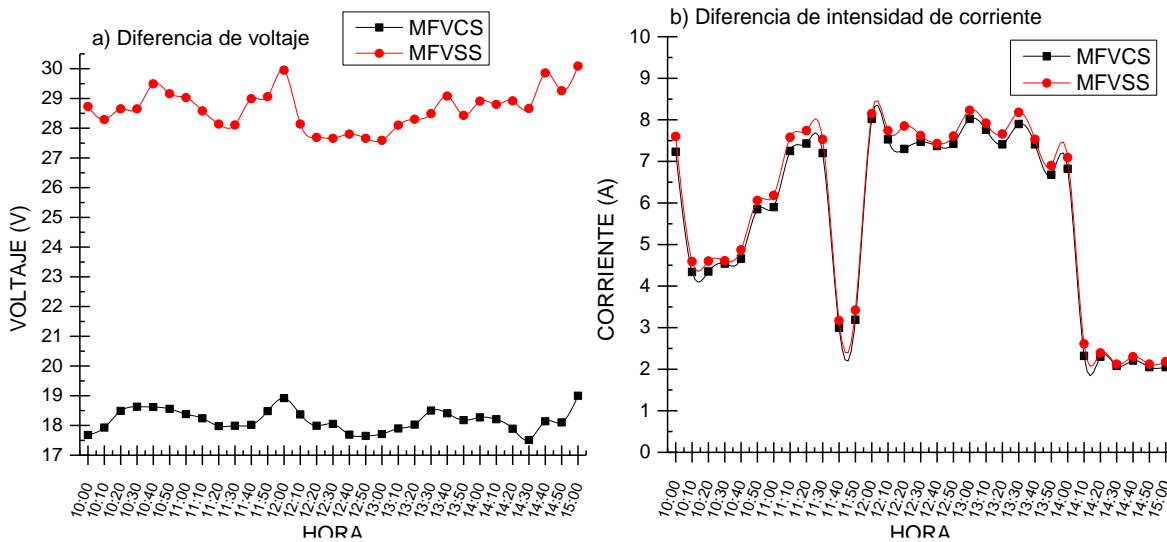
Al percibir que las pérdidas con la incidencia de esta sombra son de gran magnitud, y con base a la gráfica 20, se estableció que, la producción de energía del módulo sombreado en la mayor parte de esta evaluación fue nula, y en los periodos donde alcanzo a producir energía, su producción fue tan baja que se podría considerar despreciable.

4.2.3. Cubrir una línea de celdas del módulo FV de forma vertical (línea vertical de celdas del extremo derecho e izquierdo).



Ilustración 47. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la línea de celdas de forma vertical del extremo izquierdo de uno de los módulos del sistema.

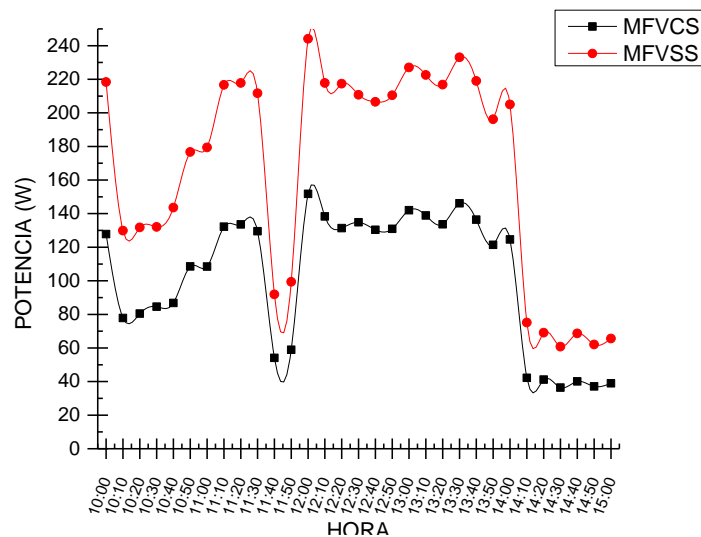
El sombreado sobre la línea vertical de celdas de uno de los módulos del sistema FV (ilustración 47), intervino de forma negativa a la entrega de los valores de voltaje e intensidad de corriente del módulo con sombra.



Gráfica 21a y Gráfica 21b. Impacto en las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre la línea de celdas de forma vertical.

En esta prueba experimental con la sombra en la línea vertical de celdas de uno de los módulos, la principal afectación se observó en el voltaje entregado por el módulo sombreado, registrando valores inferiores por un rango de 9V a 12V, con respecto a los registrados por el módulo sin sombra. Mientras que, la afectación percibida en la intensidad de corriente del módulo sombreado fue mínima, siendo inferior de 0.1A hasta 0.3A en relación a la intensidad de corriente del módulo sin sombra, incluso se registraron periodos donde los valores de intensidad de corriente de ambos módulos fueron prácticamente iguales.

Al registrar una amplia diferencia entre el voltaje de ambos módulos, siendo el voltaje entregado por el módulo con sombra inferior, el microinversor compenso este descenso del voltaje, regulando lo valores de intensidad de corriente del módulo sombreado, de forma que, la intensidad de corriente no descendiera en gran magnitud, con el propósito de aminorar las pérdidas de producción de energía del sistema.



Gráfica 22. Impacto en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre la línea de celdas de forma vertical.

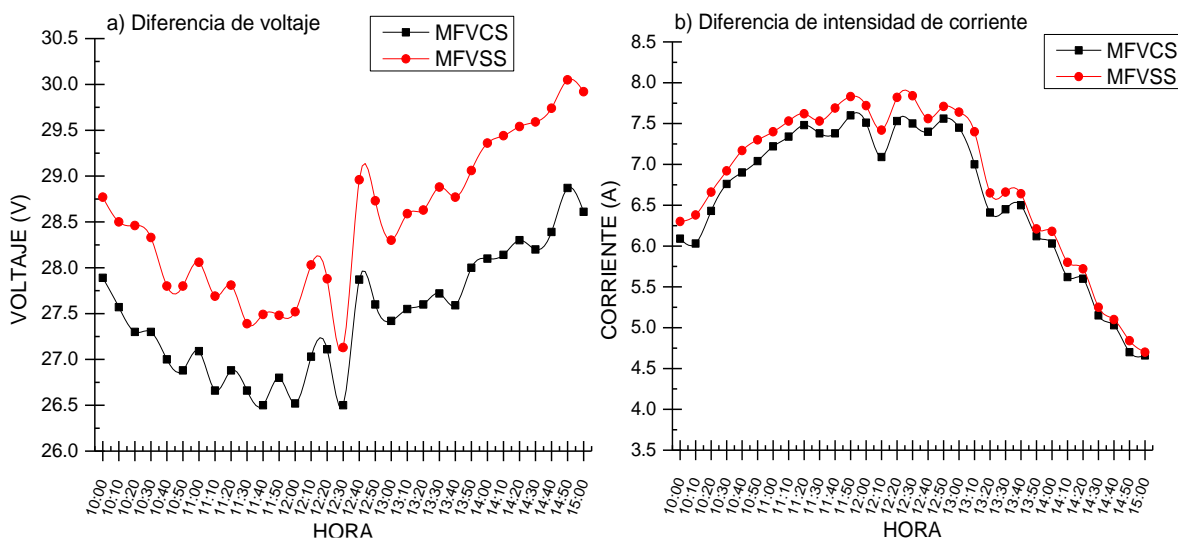
Durante esta evaluación se calculó una pérdida de energía promedio, causada por la sombra en la línea vertical de celdas sobre uno de los módulos, de 65W aproximadamente. Señalando que, en algunos periodos dentro de la evaluación, el modulo sombreado generó hasta 92W menos que el módulo sin sombra.

4.2.4. Proyección de una línea simulando un cable.



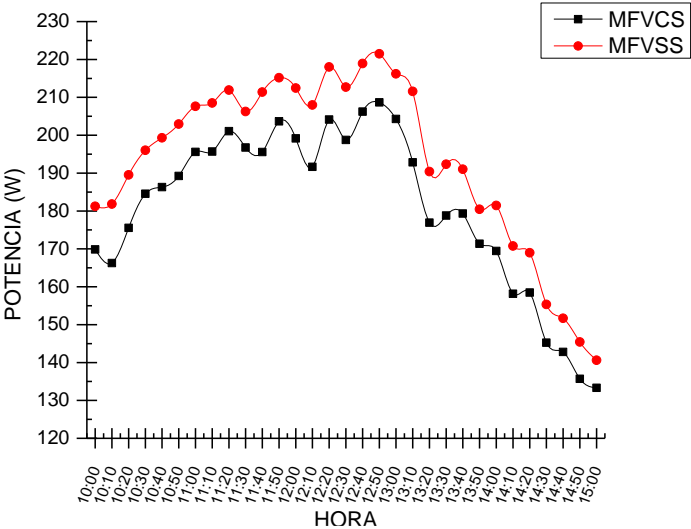
Ilustración 48. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra simulando un cable sobre uno de los módulos del sistema.

El efecto de la incidencia de la sombra de un cable sobre uno de los módulos del sistema (ilustración 48), implicó una disminución en el voltaje e intensidad de corriente del módulo con sombra de 0.6V a 1.4V y 0.1A a 0.4A, en comparación a los valores entregado por el módulo sin sombra.



Gráfica 23a y Gráfica 23b. Impacto en las características eléctricas de los módulos conectados en paralelo cuando incide la sombra de un cable sobre uno de los módulos del sistema.

Al observar que, la diferencia entre de voltaje e intensidad de corriente entregada por el módulo sombreado y el módulo sin sombra, fue relativamente mínima, se determina que las pérdidas de energía producidas por esta sombra serán, del mismo modo, mínimas.



Gráfica 24. . Impacto en la producción de energía de los módulos conectados en paralelo cuando incide la sombra de un cable sobre uno de los módulos del sistema.

Las pérdidas en la producción de energía correspondiente al módulo sombreado, fueron de, entre 9W a 18W menos que la producción de energía del módulo sin sombra. Con la excepción de los periodos donde la radiación disminuyo, registrando pérdidas pertenecientes al módulo sombreado de 7W.

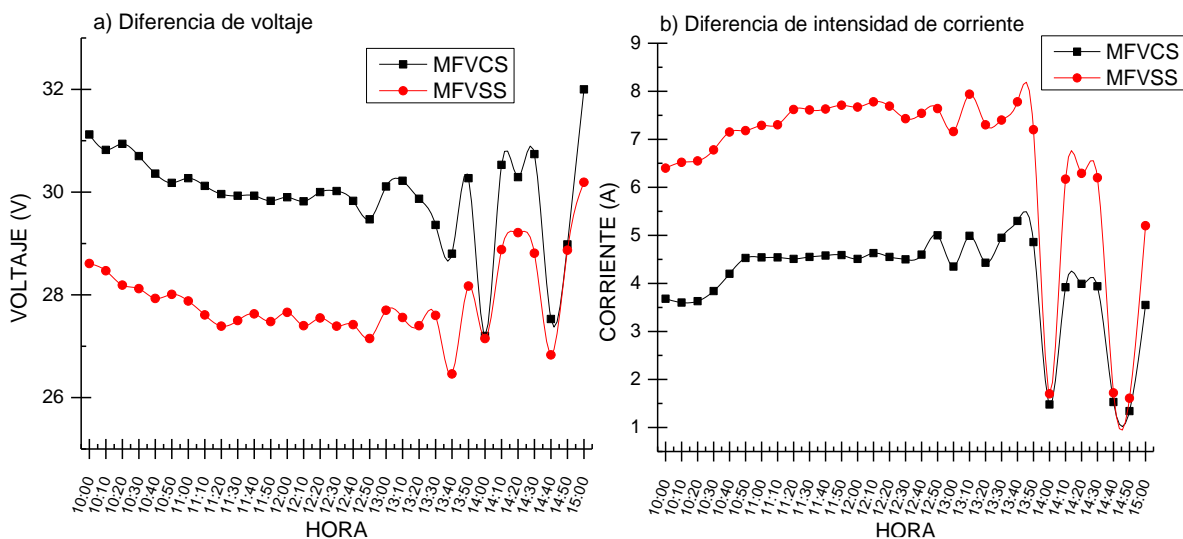
En esta evaluación se observó que, las perdidas energéticas causadas por esta sombra incidente en uno de los módulos del sistema interconectado a red, son inferiores, a comparación de las pérdidas causadas por esta misma sombra, pero proyectada en un módulo desconectado (apartado 4.1.4). Reiterando que la implementación del microinversor cumplió con su funcionamiento, de disminuir el efecto de sombreado.

4.2.5. Proyección de una sombra simulando una varilla o tubo.



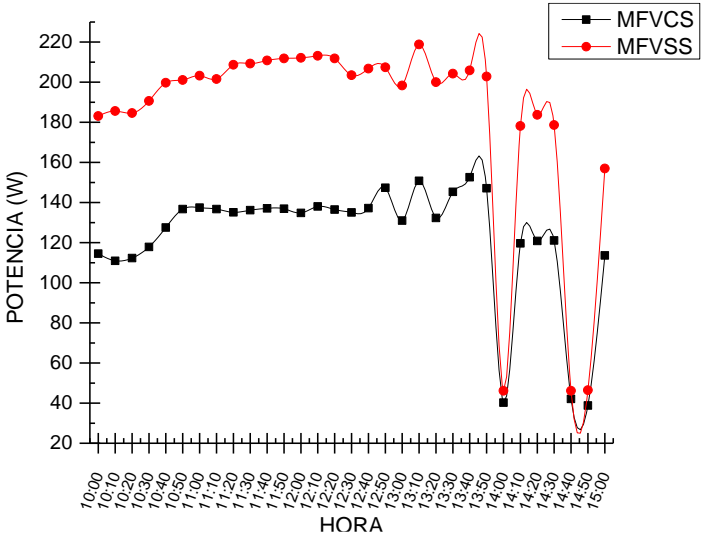
Ilustración 49. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra simulando un tubo sobre uno de los módulos del sistema.

La proyección de la sombra de un tubo sobre uno de los módulos del sistema interconectado a red (ilustración 49), provocó un decremento de 1A a 3A, en la intensidad de corriente entregada por el módulo sombreado en comparación a la intensidad de corriente entregada por el módulo sin sombra. Exceptuando los periodos donde la radiación incidente disminuyo, ocasionando que la diferencia de valores de la intensidad de corriente entre ambos módulos se reduzca hasta un 0.2A.



Gráfica 25a y Gráfica 23b. Impacto en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra simulando un tubo.

El voltaje del módulo sombreado tuvo un efecto contrario al de su intensidad de corriente, mientras que la intensidad de corriente entregada por el módulo sombreado desciende, el voltaje de este mismo, aumenta, en relación a los datos registrados del módulo sin sombra. Se registró que el voltaje del módulo sombreado fue superior por un rango de 1V a 2.6V al voltaje entregado por el módulo sin sombra. Señalando que, al igual que en el caso de la corriente, en los periodos con menor radiación la diferencia entre los valores de ambos módulos se reduce, en este caso, la diferencia fue de 0.1V.



Gráfica 26. . Impacto en las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra simulando un tubo.

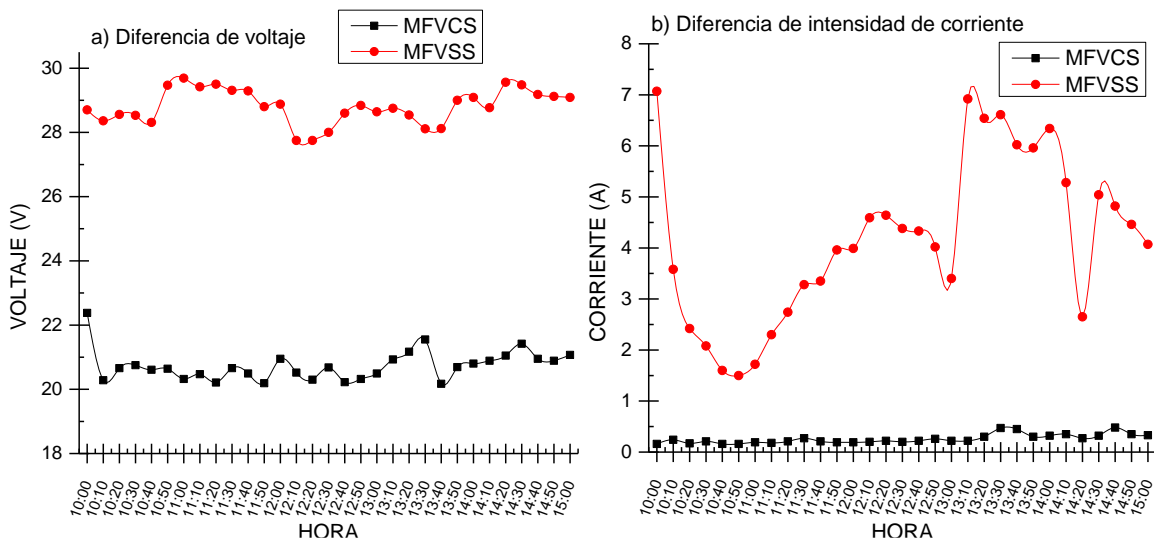
El módulo con sombra presento pérdidas en su producción energética de 43W en el mejor de los casos, y hasta 78W en la peor condición. Indicando que, en los periodos con menos radiación incidente las pérdidas energéticas disminuyen, registrando pérdidas de 4W hasta 7W.

4.2.6. Cubrir la mitad del módulo.



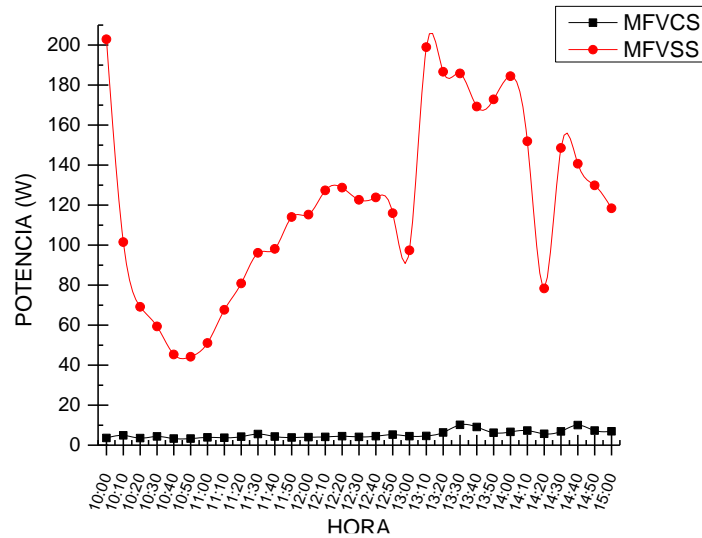
Ilustración 50. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra en la mitad de las celdas de forma vertical del extremo izquierdo de uno de los módulos del sistema.

Al cubrir la mitad de las celdas de uno de los módulos de sistema FV (ilustración 50), tanto el voltaje como la intensidad de corriente que entrega el módulo sombreado disminuyeron en gran magnitud. Comparando los valores entregados del módulo sin sombra y el módulo con sombra, se observó que, el voltaje del módulo sombreado era inferior por un rango de 6V a 9V, con respecto al entregado por el módulo sin sombra. En lo referente a la intensidad de corriente, el módulo sombreado entregó valores cercanos a los 0A, por lo que se considera que en el módulo no hay un flujo de energía.



Gráfica 27a y Gráfica 25b. Impacto en las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre la mitad de las celdas del módulo.

La sombra al no permitir el flujo de energía por el módulo donde incide, invalida el rendimiento del módulo, ya que, al no fluir la energía dentro de este, su producción energética es cero. Por lo cual, la proyección de la sombra sobre la mitad de las celdas del módulo provoca la pérdida absoluta de la producción de energía del módulo.



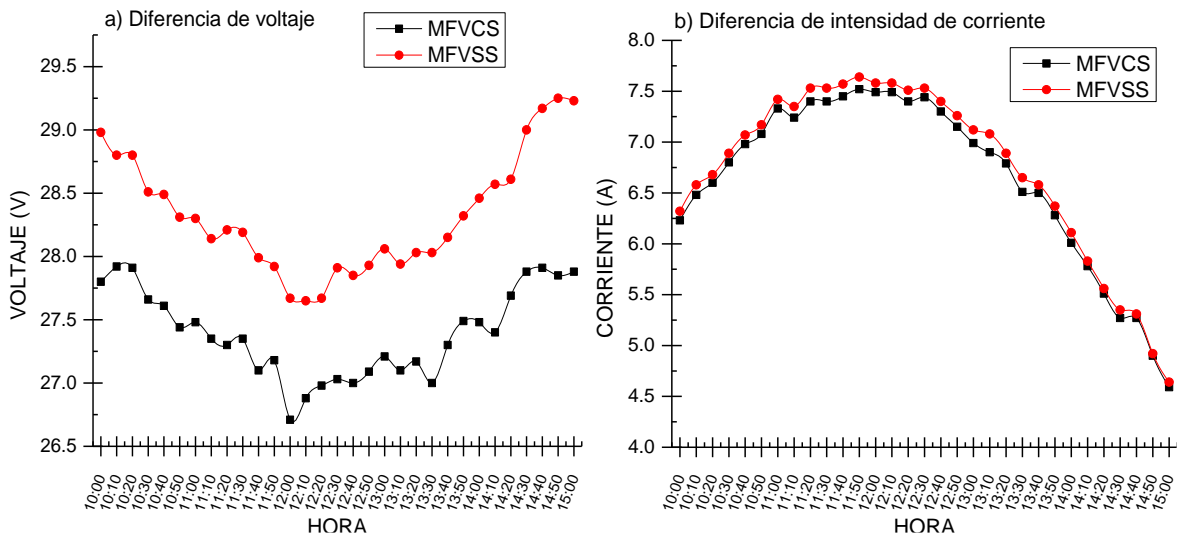
Gráfica 28. . Impacto en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando en un módulo se proyecta una sombra sobre la mitad de las celdas del módulo.

4.2.7. Simulación de una mancha pequeña similar el excremento de aves.



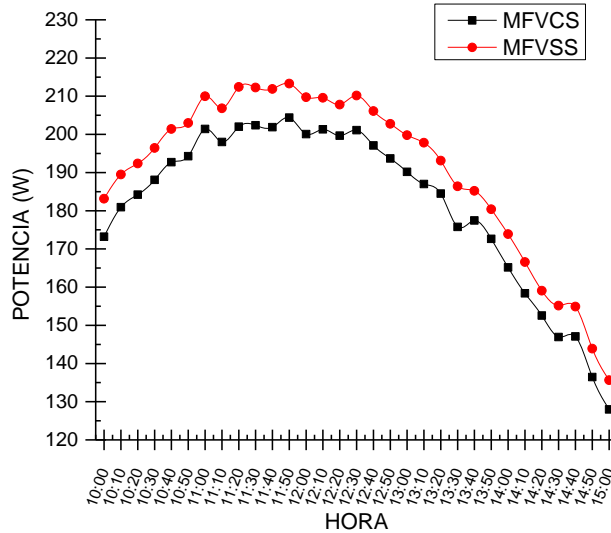
Ilustración 51. Sistema fotovoltaico interconectado a red con una sombra simulando excremento de aves sobre uno de los módulos del sistema.

La sombra del excremento de aves sobre uno de los módulos del sistema FV, provoca una disminución de 0.7V a 1.4V en los valores del voltaje entregado por el modulo sombreado, con respecto a, los valores entregados por el módulo sin sombra. En cuanto, al efecto sobre la intensidad de corriente del módulo sombreado, se percibió que este disminuyó de 0.02A a 1.2A, en relación con la intensidad de corriente entregada por el módulo son sombra.



Gráfica 29a y Gráfica 29b. Impacto en las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando se proyecta una sombra similar al excremento de aves sobre uno de los módulos.

La diferencia entre los valores de la intensidad de corriente entregada por ambos módulos, es prácticamente despreciable, en la mayor parte de esta evaluación.



Gráfica 30. Impacto en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando se proyecta una sombra similar al excremento de aves sobre uno de los módulos.

Debido a la mínima descenso en los valores de la intensidad de corriente del módulo sombreado, se observó que, las pérdidas energéticas del módulo sombreado son mismo modo mínimas. Las pérdidas en la producción de energía del módulo con sombra fueron de 6W hasta 10W.

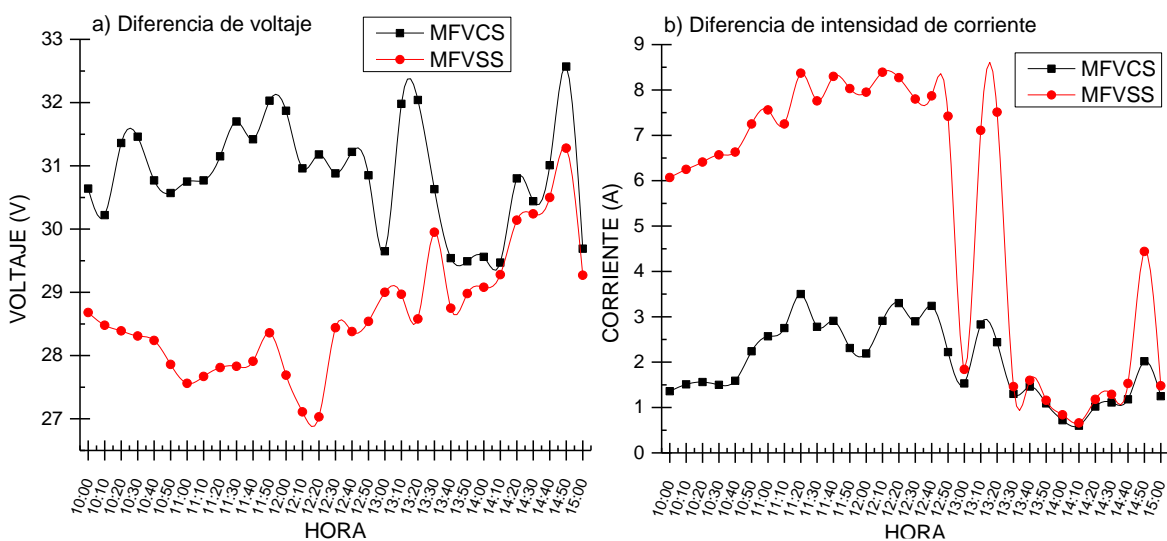
4.2.8. Proyección de la sombra de una rama.

El impacto de la proyección de la sombra de la rama de un árbol sobre un de los módulos del sistema FV (ilustración 52), fue negativo en el rendimiento del módulo sombreado, al igual que en los casos anteriores con otras sombras.



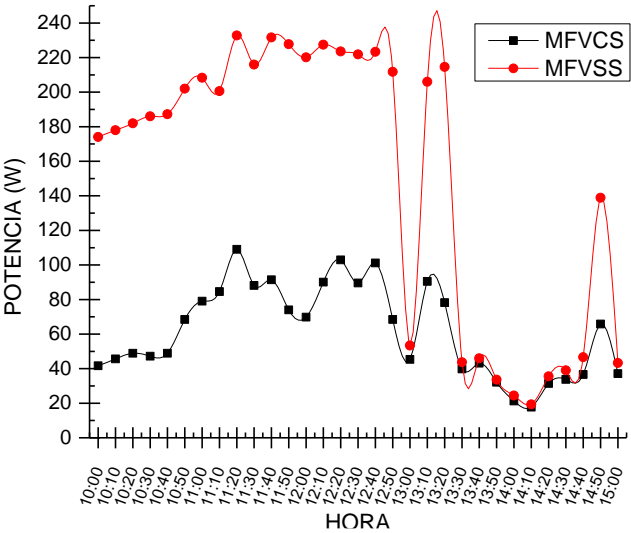
Ilustración 52. Sistema fotovoltaico interconectado a red con la sombra de una rama de un árbol sobre uno de los módulos del sistema.

En esta evaluación el voltaje del módulo sombreado es superior por un intervalo de 1V a 4.2V al del voltaje entregado por el módulo sin sombra. Sin embargo, en el periodo de las mediciones de las 13:30 pm hasta las 15:00 pm, comenzó a llover, por lo cual al incidir menos radiación solar por la lluvia la diferencia de voltajes entre ambos módulos se reduce, siendo el voltaje del módulo sombreado superior por un intervalo de 0.06V hasta 0.35V.



Gráfica 31a y Gráfica 31b. Impacto en las características eléctricas de los módulos conectado en paralelo cuando incide la sombra de una rama de un árbol sobre uno de los módulos del sistema.

Mientras, el voltaje entregado por el módulo sombreado aumento su intensidad de corriente disminuyo, siendo inferior por un rango de 2A hasta 6A, con respecto de la intensidad de corriente entregada por el módulo sin sombra. Durante el periodo de la prueba donde se presentó la lluvia, al igual que, en el caso del voltaje, la diferencia entre la intensidad de corriente de ambos módulos se reduce, siendo la intensidad de corriente entregada por el módulo sombreado inferior por un rango de 0.06A hasta 0.35A.



Gráfica 32. Impacto en la producción de energía de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo cuando incide la sombra de una rama de un árbol sobre uno de los módulos.

La producción de energía entregada por el módulo con sombra registro perdidas de 115W hasta 154W. Sin embargo, estas pérdidas se redujeron en el periodo de lluvia, en donde el módulo sombreado produjo de 1W hasta 10W menos que la producción de energía del módulo sin sombra.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.

De acuerdo con los objetivos planteados en el presente trabajo se concluye que:

- Se realizó de forma exitosa la instalación y conexión del sistema fotovoltaico con los dos módulos fotovoltaicos marca CONNERA.
- Las proyecciones de las sombras propuestas se efectuaron adecuadamente, cerciorándose en todos los casos que la sombra en ningún momento llegara a interferir en el otro módulo, tanto en la etapa de evaluaciones con los módulos desconectados, como en la etapa de evaluaciones en el sistema interconectado a red, el procedimiento exitoso de estas proyecciones permitieron que se realizaran las mediciones pertinentes de forma adecuada, con las cuales, se obtuvieron todos los datos que facilitaron el análisis del efecto de las sombras en los módulos fotovoltaicos.
- Del análisis del efecto sombra en los módulos fotovoltaicos desconectados, se determinó que el efecto de la mayoría de las sombras proyectadas consistió en pérdidas de producción de energía de un rango de 20W a 50W, con la excepción del efecto percibido en dos de las sombras proyectadas, donde en una de ellas se registró una pérdida energética menor a la mencionada, mientras, con la otra sombra las pérdidas de energía eran superiores; la primera, en donde se sombreaba una sola celda del módulo, se registró una pérdida energética de 10W a 18W, siendo esta la sombra que menor efecto tuvo en la producción de energía del módulo. Por otra parte, el sombreado de toda una línea horizontal de celdas, provocó el mayor impacto en el rendimiento del módulo, ya que, al proyectar esta sombra sobre el módulo, su producción de energía es nula.
- Del análisis del efecto sombra sobre uno de los módulos fotovoltaicos pertenecientes a un sistema interconectado a red, se determinó que, la sombra del excremento de aves fue la que menos afectó la producción de energía del módulo, registrando

pérdidas de 6W a 10W. Por otra parte, la proyección de las sombras sobre la línea superior de celdas; y la sombra sobre la mitad de las celdas del módulo afecto en su totalidad el rendimiento del módulo sombreado, siendo inexistente su producción de energía.

Además, se observó que las pérdidas en la producción de energía del módulo sombreado dependen de gran forma a la radiación incidente, ya que, cuando incidió mayor radiación se registraron mayores pérdidas en el módulo sombreado, siendo el caso de la evaluación realizada con la sombra de la rama de un árbol, que en la mayor parte de la de la prueba experimental registró pérdidas en su producción de energía de más de 100W, mientras que, en el periodo donde la radiación solar disminuyó debido a la lluvia, las pérdidas se redujeron a un rango de 1W a 10W. Lo mismo sucedió en las evaluaciones donde se proyectaron la sombra de un cable; donde las pérdidas pasaron de ser de 9W a 18W, a ser de 7W; y la sombra de un tubo; donde las pérdidas registradas pasaron de ser de 43W a 78W, a ser de 4W a 7W. Si bien, en estas evaluaciones no se presentaron precipitaciones, el cielo se encontraba con mucha nubosidad, lo cual, disminuía la radiación incidente.

- Del desarrollo de los dos análisis, se establece que, en ambos casos, la diferencia de producción de energía entre el módulo sombreado y el módulo sin sombra, se amplifica en los periodos donde incide mayor radiación, implicando mayores pérdidas energéticas, mientras que, en los periodos donde la radiación incidente disminuye, la diferencia entre la producción de energía del módulo sombreado y la del módulo sin sombra, se reduce, comprendiendo menores pérdidas energéticas.
- Adicional a las conclusiones pertenecientes a los objetivos planteados, se comprobó que la implementación de microinversores en sistemas fotovoltaicos, mantienen el rendimiento de los módulos conectados al sistema de forma independiente, lo que asegura el máximo rendimiento del sistema FV y por consecuencia disminuye las pérdidas energéticas.

Se observó que, al detectar que uno de los módulos del sistema entrega valores inferiores a los que debería entregar, el microinversor compensa de alguna forma el

descenso de estos valores, compensación que consistió en que, cuando el voltaje entregado por el módulo con sombra era inferior, su intensidad de corriente no disminuía en gran magnitud, y en el caso contrario, donde la intensidad de corriente entregada era inferior, el voltaje aumentaba.

REFERENCIAS.

[1] Jonathan, M. (2013). “IMPLEMENTACIÓN DE PANELES SOLARES EN CASA HABITACIÓN”. Instituto politécnico nacional. Estado de México, México.

[2] Flores Norma & Ramírez Miguel. “MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS PANELES SOLARES DE SILICIO”. Centro de investigación en materiales avanzados, S.C. Posgrados.

[3] Cepeda Juan & Sierra Adriana (2017). “ASPECTOS QUE AFECTAN LA EFICIENCIA EN LOS PANELES FOTOVOLTAICOS Y SUS POTENCIALES SOLUCIONES”. Universidad Santo Tomas, Bogotá, Colombia.

[4] Ramaprabha, Ramabadran & Badrilal, Mathur (2009). “EFFECT OF SHADING ON SERIES AND PARALLEL CONNECTED SOLAR PV MODULES”. Canadian Center of Science and Education, Modern Applied Science, Vol. 3, No. 10.

[5] A. Ibrahim (2011). “EFFECT OF SHADOW AND DUST ON THE PERFORMANCE OF SILICON SOLAR CELL”. Journal of Basic and Applied Scientific Research.

[6] Wendlandt, Stefan; Drobisch, Alexander; Tornow, Dirk; Friedrichs, Matthias; Krauter, Stefan & Grunow, Paul (2011). “OPERATING PRINCIPLE OF SHADOWED C-SI SOLAR CELL IN PV-MODULES”. Photovoltaic Institute Berlin, Berlin, Germany.

[7] Abdulazeez, Mohammed & Iskender, Ires (2011). “SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF SHADING EFFECT ON SERIES AND PARALLEL CONNECTED PHOTOVOLTAIC PV MODULES”. 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Institute of Electrical and Electronics Engineers.

[8] SolarEdge Technologies Inc. (2013). “PERFORMANCE OF PV TOPOLOGIES UNDER SHADED CONDITIONS”. National Renewable Energy Laboratory.

[9] Rincón, Samuel & Álvarez Adrián (2013). “INTEGRACIÓN FOTOVOLTAICA EN EDIFICIOS”. Universidad de Valladolid, España.

[10] I. Sari-Ali, B. Chikh-Bled & B. Benyoucef (2014). “EFFECT OF SHADING ON THE PERFORMANCE ON SOLAR PHOTOVOLTAIC”. International Journal of Applied Engineering Research and Development (IJAERD)

[11] Palomo, Antonio (2016). “ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE INCIDENCIAS EN LA OPERACIÓN DE PLANTAS FOTOVOLTAICAS”. Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.

[12] Susanne Gooijer & Lisanne van Dijk (2016). “SHADING OF SOLAR CELLS. THE INFLUENCE OF SHADING ON COMMERCIAL SOLAR CELL PERFORMANCE”.

[13] Walaa Abdelmajeed Ebrahim (2016). “THE EFFECTS OF PARTIAL SHADING AND DUST ON THE PERFORMANCE OF SOLAR CELLS”. College of Graduate Studies, Department of Physics, Sudan University of Science and Technology.

[14] Gonzáles Pablo, Sevilla (2016). “EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN LA OPERACIÓN DE PLANTAS FOTOVOLTAICAS. Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.

[15] D. De Yong, M. Maldonado, S. Lovera, F. Magnago (2016). “ANÁLISIS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OPERANDO BAJO CONDICIONES DE SOMBRA PARCIAL”. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.

[16] Jensen, R. E. (2017). “GENERATING SHADOWS FOR URBAN DESIGN”. Universidad de Redlands, California, Estados Unidos.

[17] Jeevan A. Davari & Mahesh M. Wagh (2018). “REVIEW ON ANALYSIS OF THE SHADOW EFFECT ON THE POWER OUTPUT CHARACTERISTICS OF SOLAR CELL, SOLAR PANEL AND SMALL-SCALE SOLAR SYSTEM”. International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM).

[18] Handoko Rusiana Iskanda, Yuda Bakti Zainal & Susanto Sambasri (2018). “STUDY AND ANALYSIS OF SHADING EFFECTS ON PHOTOVOLTAIC APPLICATION SYSTEM”. MATEC Web Conf. The 1st International Conference on Industrial, Electrical and Electronics (ICIEE).

[19] Fonseca, Rubén (2018). “THE IMPACT OF SHADOWING IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AND HOW TO MINIMIZE IT”. Faculty Of Engineering And Sustainable Development, University of Gävle.

[20] Shuvo Biswas, B.K. Karmaker (2019). “ANALYZING EFFECTS OF PARAMETERS AND PARTIAL SHADOW ON CHARACTERISTICS OF A SOLAR MODULE”. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE).

[21] C. L. Cortés, G. S. Gómez-Gómez, F. Betancur-Londoño, S. X. CarvajalQuintero, N. Guerrero-González (2020) “ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CON INVERSOR CENTRALIZADO Y CON MICROINVERSORES: CASO DE ESTUDIO MANIZALES”. TecnoLógicas, vol. 23, no. 47, pp. 1-21

[22] Silva, Martin (octubre 2020). “MODELADO Y ESTUDIO DEL IMPACTO DE SOMBRAS SOBRE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS”. Universidad Nacional de Mar del Plata.

[23] Sánchez A. Pablo (2021). “INSPECCIÓN DE PANELES SOLARES EN PLANTAS FOTOVOLTAICAS MEDIANTE CURVAS CORRIENTE-VOLTAJE (I-V)”. Universidad de Valladolid, España.

[24] Ramkiran Bhallamudi1, Sudhakar Kumarasamy & Chinnayan Karuppaiyah Sundarabalan (2021). “EFFECT OF DUST AND SHADOW ON PERFORMANCE OF SOLAR PHOTOVOLTAIC MODULES: EXPERIMENTAL ANALYSIS”. Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineers.

[25] Welsh, Patrick (2022). “ANALYSIS OF THE EFFECTS OF SHADING OVER A PV SYSTEM: MPPT UNDER PERIODIC PARTIAL SHADING CONDITIONS”. Department of engineering, University of Porto, Portugal.

[26] Christian, O, & Diego, P. (2019). “MODELO MATEMATICO DE UNA ESTRUCTURA REFLECTIVA PARA INCREMENTAR LA IRRADIANCIA SOBRE PANELES SOLARES”. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

[27] Alonso, José. “RADIACIÓN, GEOMETRÍA, RECORRIDO ÓPTICO, IRRADIANCIA Y HSP”. Departamento técnico de SunFields Europe. [En línea]. Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/energia-fotovoltaica-radiacion-geometria-recorrido-optico-irradiancia-y-hsp/>

[28] Barragán Miguel (2014). “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA LA UTM”. Universidad Tecnológica de Morelia.

[29] Dexen Energy, “PANELES SOLARES”. [En línea]. Disponible en: <https://www.dexen.mx/paneles-solares-modulos-solares/>.

[30] AutoconsumoFV. “QUE ES Y CÓMO FUNCIONA UNA PLACA SOLAR FOTOVOLTAICA”. [En línea]. Disponible en: <https://autoconsumofv.com/autoconsumo/que-es-y-como-funciona-una-placa-solar/>.

[31] Fácil Electro (2019). “ENERGÍA FOTOVOLTAICA”. [En línea]. Disponible en: <https://www.facilelectro.es/energia-fotovoltaica/>.

[32] Barra David (2019). “SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE SANTO DOMINGO”. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

[33] González, J. R. (2016). “PROYECTO PILOTO PARA LA ALIMENTACIÓN DE SISTEMA MOTRIZ DE AGUA POTABLE DE UN CONDOMINIO MEDIANTE EL USO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS”. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

[34] Palleja Jordi. (2012) “ESTUDIO DE LA AFECTACIÓN DE SOMBRAS ES UN PAEL FOTOVOLTAICO”. Universidad Rovira i Virgili. Cataluña, España.

[35] Camacho José (2012). “IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO MÓVIL DE 1000W”. Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena.

[36] Alonso, José. “MANUAL DE CÁLCULO DE INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA AISLADA CON BATERÍAS”. SunFields Europe. [En línea]. Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/calculo-sistema-fotovoltaico-aislado/>.

[37] SolarMex. “SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTERCONECTADO A RED”. [En línea]. Disponible en: <https://www.gruposolarmex.com/10-productos-y-servicios/17-sistemas-fotovoltaicos-interconectados-a-la-red>.

[38] R. A. Messenger y J. Ventre (2010). “PHOTOVOLTAIC SYSTEMS ENGINEERING”, 3a ed., Abingdon: Taylor & Francis Group.

[39] K. Chari y A. Dessai (2015). “DESIGN OF LOW POWER SOLAR MICRO INVERTER FOR HOME APPLICATION,” Multidiscip. J. Res. Eng. Technol., pp. 74–79.

[40] Área Técnica de Alba Solar (2022). “QUÉ ES EL OPTIMIZADOR DE SOMBRAS”. [En línea]. Disponible en: <https://albasolar.es/optimizador-de-sombras-que-es/>.

[41] Ficha Técnica Módulo fotovoltaico CONNERA ASTRAL DUO280-P60.

[42] ApSystems Microinverter YC600B Datasheet. [En línea]. Disponible en:
https://latam.apsystems.com/wp-content/uploads/2020/09/4302110202_APsistemas-Microinverter-YC600B-for-ALL-LATAM-Datasheet-SP.pdf.

ANEXOS.

ANEXO 1. MONTAJE DEL INVERSOR E INTALACIÓN ELÉCTRICA.



Ilustración 53. Microinversor instalado en la estructura metálica de los módulos.

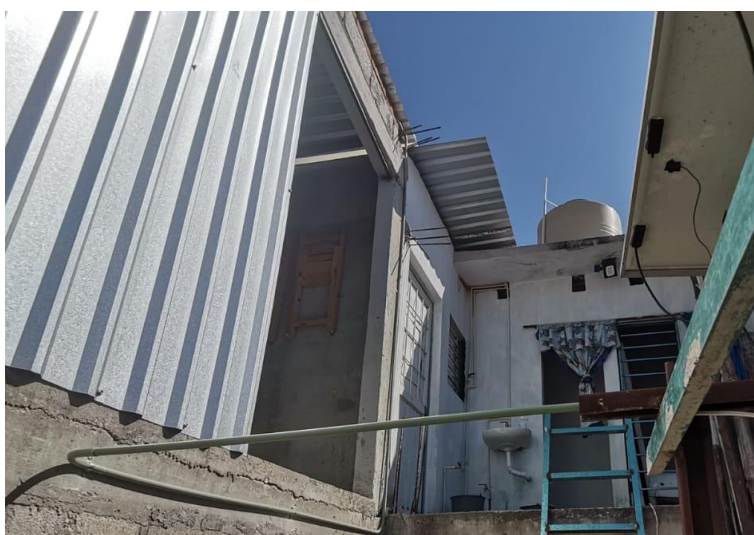


Ilustración 54. Tubo conduit instalado de la estructura metálica de los módulos a la pared.



Ilustración 55. Tubo conduit instalado en la pared exterior del taller que se conectó al tubo instalado en la estructura metálica de los módulos.

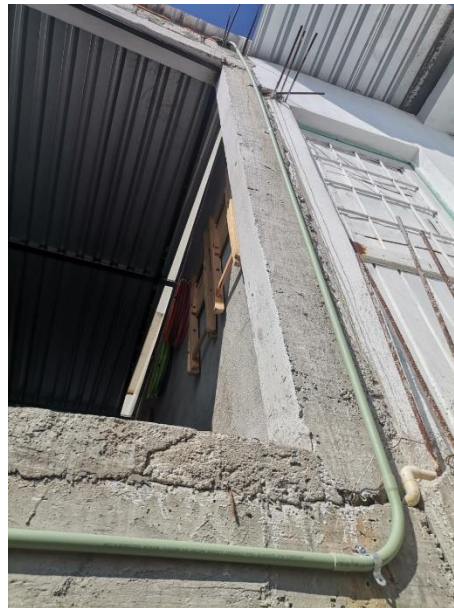


Ilustración 56. Tubo conduit instalado a lo alto de la pared exterior del taller.



Ilustración 57. Conexión eléctrica a la pastilla termomagnética y al centro de carga.



Ilustración 58. Conexión del microinversor a los módulos fotovoltaicos y a la red eléctrica.

ANEXO 2. FORMATO DE LAS TABLAS UTILIZADAS PARA LA ANOTACIÓN DE LOS DATOS RECABADOS EN LAS DOS ETAPAS DEL PROYECTO.

HORA	RADIACIÓN	MÓDULO FV CON SOMBRA				MÓDULO FV SIN SOMBRA			
		VOLTAJE (V)	CORRIENTE (A)	TEMP. (°C)	POTENCIA (W)	VOLTAJE (V)	CORRIENTE (A)	TEMP. (°C)	POTENCIA (W)
10:00:00 a. m.									
10:10:00 a. m.									
10:20:00 a. m.									
10:30:00 a. m.									
10:40:00 a. m.									
10:50:00 a. m.									
11:00:00 a. m.									
11:10:00 a. m.									
11:20:00 a. m.									
11:30:00 a. m.									
11:40:00 a. m.									
11:50:00 a. m.									
12:00:00 p. m.									
12:10:00 p. m.									
12:20:00 p. m.									
12:30:00 p. m.									
12:40:00 p. m.									
12:50:00 p. m.									
01:00:00 p. m.									
01:10:00 p. m.									
01:20:00 p. m.									
01:30:00 p. m.									
01:40:00 p. m.									
01:50:00 p. m.									
02:00:00 p. m.									
02:10:00 p. m.									
02:20:00 p. m.									
02:30:00 p. m.									
02:40:00 p. m.									
02:50:00 p. m.									
03:00:00 p. m.									

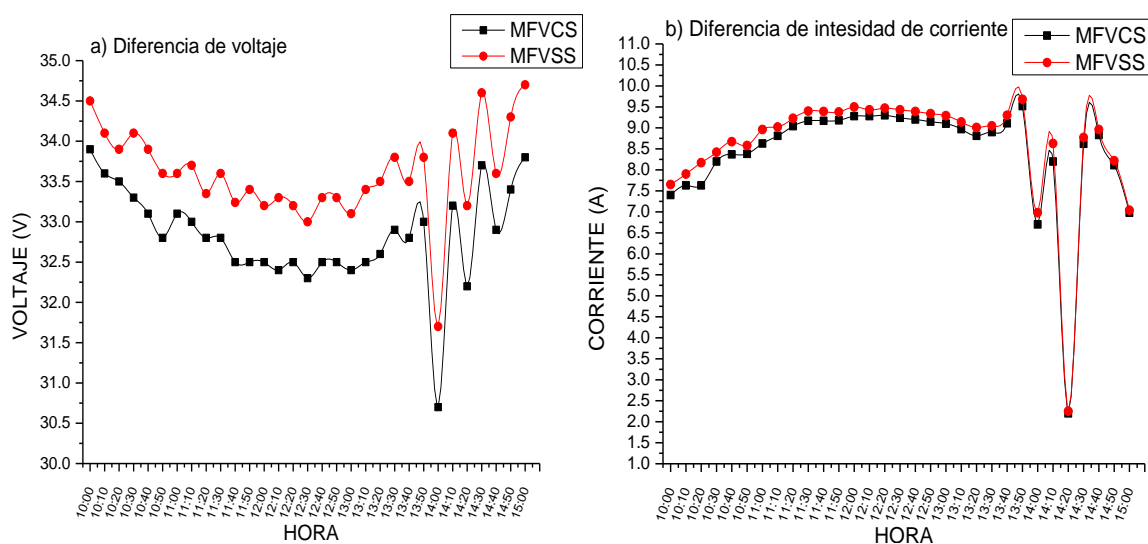
Tabla 5. Formato de recolección datos de la Etapa 1: Efecto de sombras en módulos desconectados.

HORA	RADIACIÓN	MÓDULO FV CON SOMBRA				MÓDULO FV SIN SOMBRA				VALORES DE SALIDA DEL INVERSOR	
		VOLTAJE (V)	CORRIENTE (A)	TEMP. (°C)	POTENCIA (W)	VOLTAJE (V)	CORRIENTE (A)	TEMP. (°C)	POTENCIA (W)	VOLTAJE (V)(AC)	CORRIENTE (A)(AC)
10:00:00 a. m.											
10:10:00 a. m.											
10:20:00 a. m.											
10:30:00 a. m.											
10:40:00 a. m.											
10:50:00 a. m.											
11:00:00 a. m.											
11:10:00 a. m.											
11:20:00 a. m.											
11:30:00 a. m.											
11:40:00 a. m.											
11:50:00 a. m.											
12:00:00 p. m.											
12:10:00 p. m.											
12:20:00 p. m.											
12:30:00 p. m.											
12:40:00 p. m.											
12:50:00 p. m.											
01:00:00 p. m.											
01:10:00 p. m.											
01:20:00 p. m.											
01:30:00 p. m.											
01:40:00 p. m.											
01:50:00 p. m.											
02:00:00 p. m.											
02:10:00 p. m.											
02:20:00 p. m.											
02:30:00 p. m.											
02:40:00 p. m.											
02:50:00 p. m.											
03:00:00 p. m.											

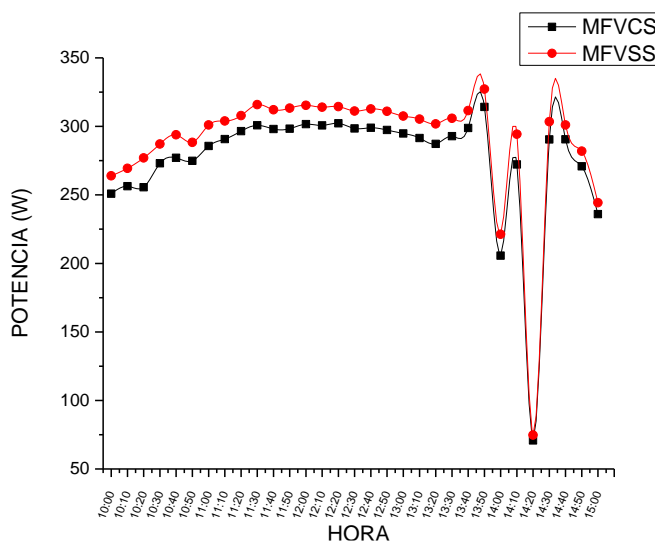
Tabla 6. Formato de recolección de datos de la Etapa 2: Efecto de las sombras en un sistema interconectado a red.

ANEXO 3. GRÁFICAS COMPLEMENTARIAS DE LA ETAPA 1 DE LOS RESULTADOS.

- CUBRIR UNA CELDA EN DIFERENTES PUNTOS DEL MÓDULO (ESQUINAS SUPERIORES E INFERIORES).
 - Gráficas correspondientes a la evaluación del efecto de sombrear la celda superior izquierda de uno de los módulos.

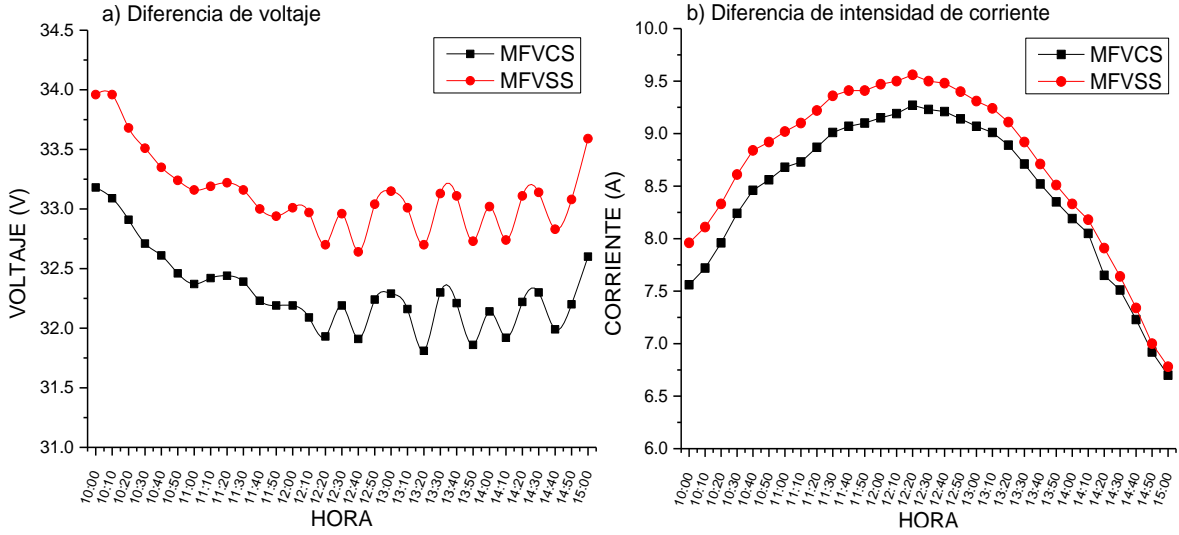


Gráfica 33a y Gráfica 33b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.

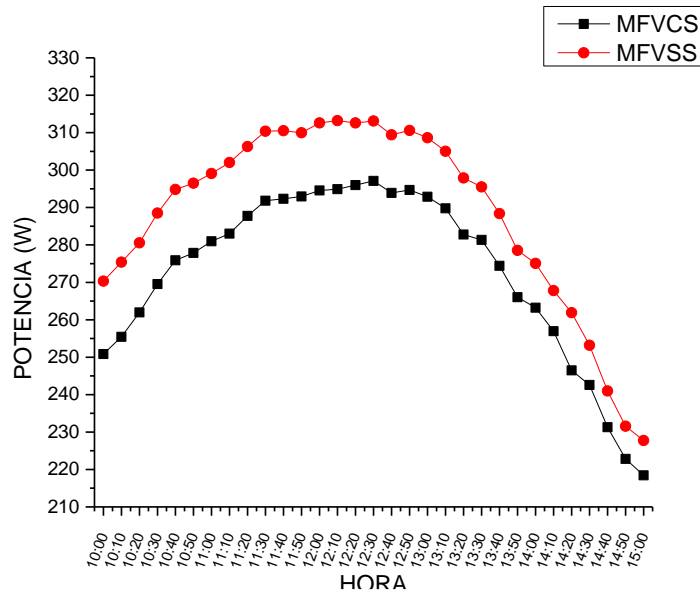


Gráfica 34. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.

- Gráficas correspondientes a la evaluación del efecto de sombrear la celda superior derecha de uno de los módulos.

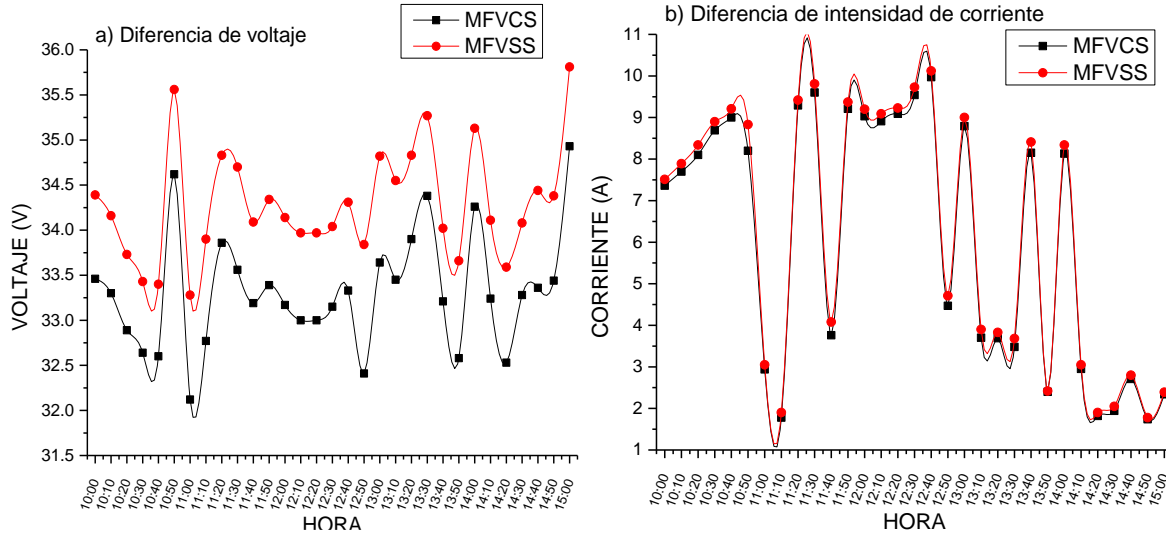


Gráfica 35a y Gráfica 35b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.

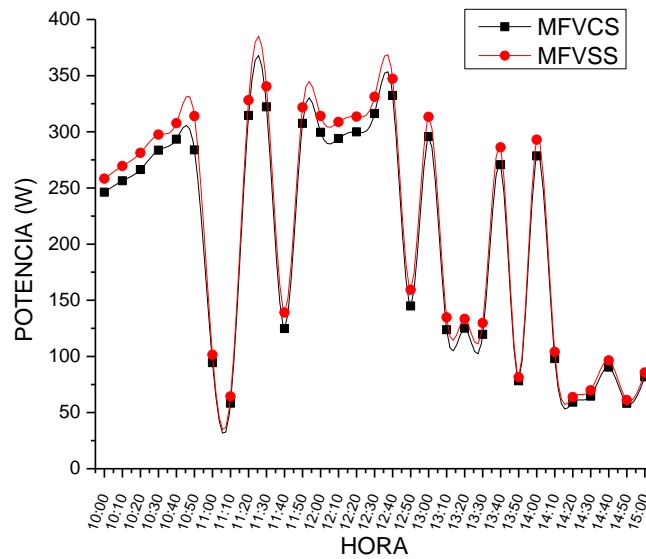


Gráfica 36. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.

- Gráficas correspondientes a la evaluación del efecto de sombrear la celda inferior izquierda de uno de los módulos.

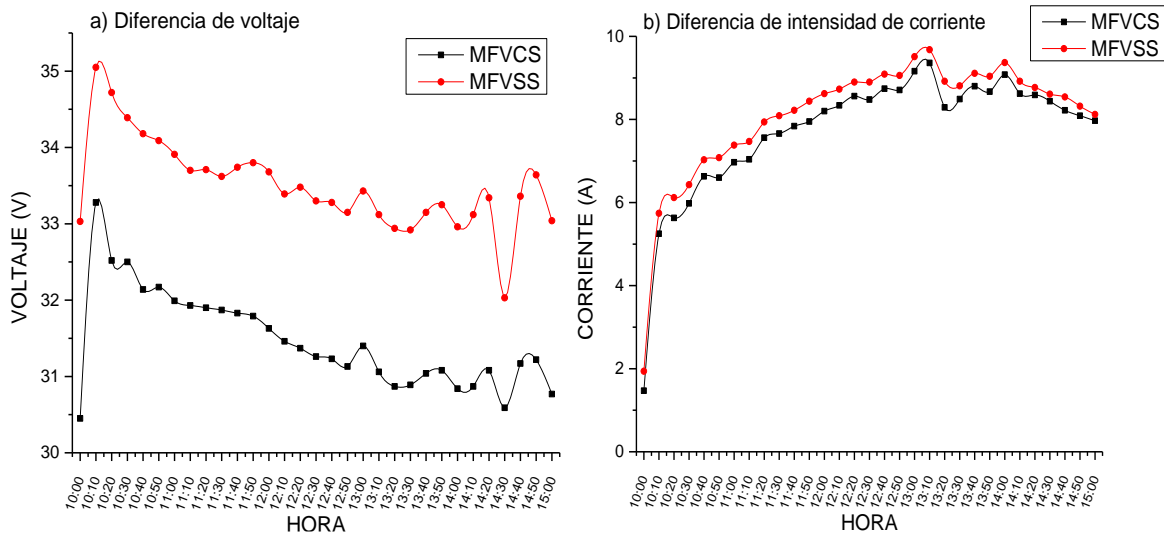


Gráfica 37a y Gráfica 37b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.

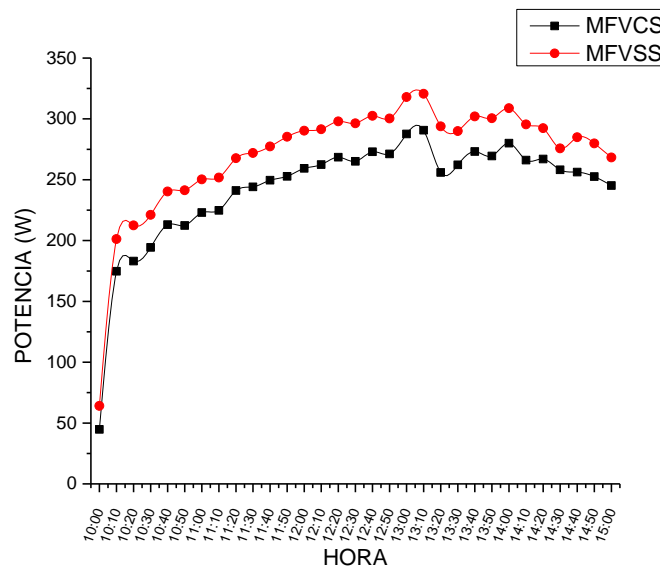


Gráfica 38. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear una sola celda.

- CUBRIR UNA LÍNEA DE CELDAS DEL MÓDULO FV DE FORMA VERTICAL (LÍNEA VERTICAL DE CELDAS DEL EXTREMO DERECHO E IZQUIERDO).
 - Gráficas correspondientes a la evaluación del efecto de sombrear la línea vertical de celdas del extremo derecho de uno de los módulos.



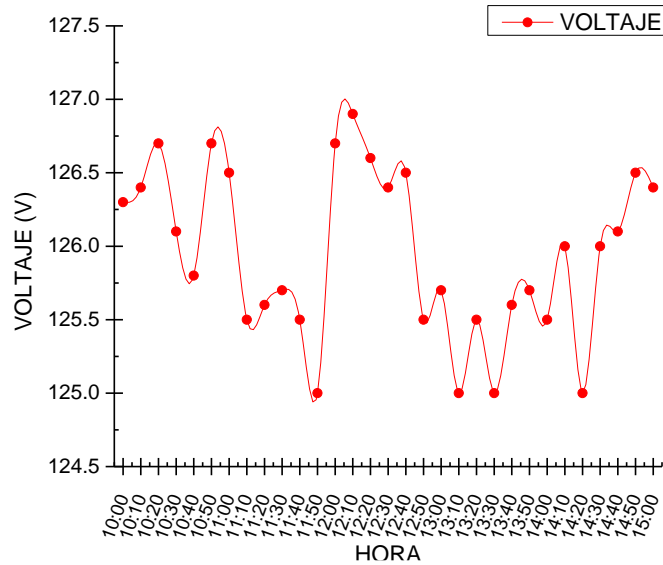
Gráfica 39a y Gráfica 39b. Impacto en las características eléctricas de un módulo fotovoltaico al sombrear una línea de celdas de forma vertical.



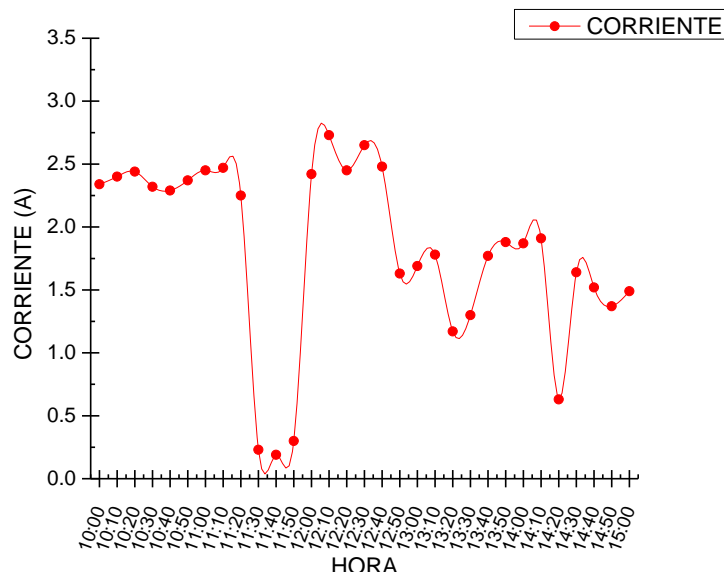
Gráfica 40. Impacto en la producción de energía de un módulo fotovoltaico al sombrear una línea de celdas de forma vertical.

ANEXO 4. GRÁFICAS COMPLEMENTARIAS DE LA ETAPA 2 DE LOS RESULTADOS.

- CUBRIR UNA CELDA EN DIFERENTES PUNTOS DEL MÓDULO (ESQUINAS SUPERIORES E INFERIORES).

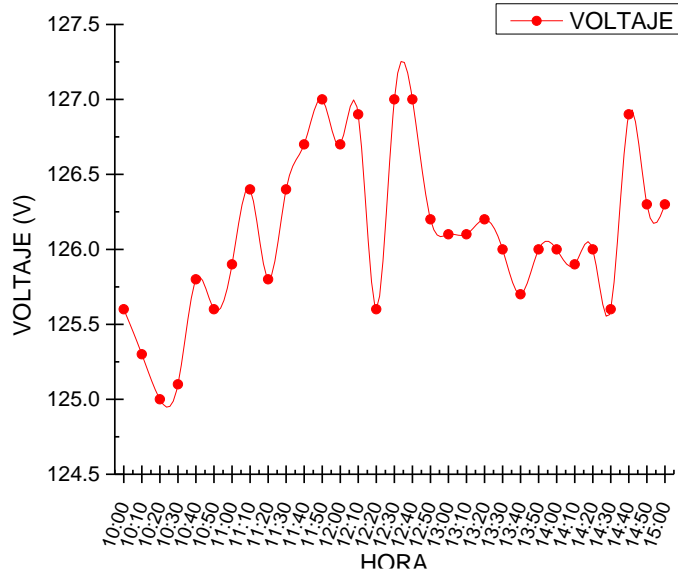


Gráfica 41. Voltaje AC de salida del microinversor

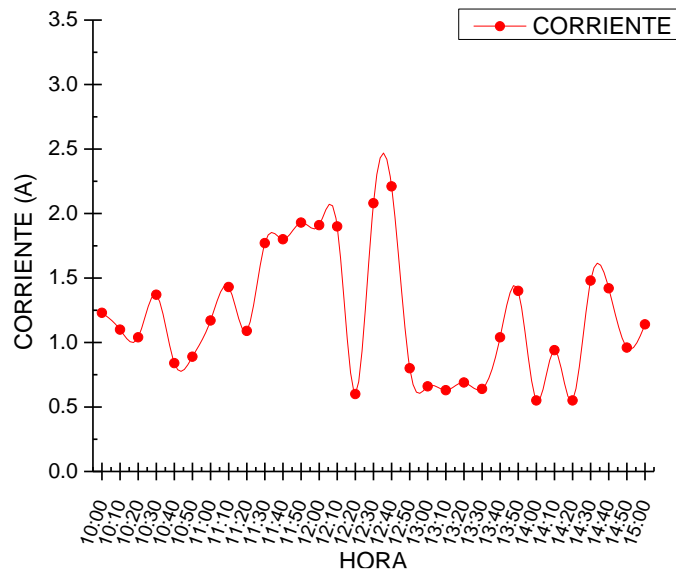


Gráfica 42. Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.

- CUBRIR UNA LÍNEA DE CELDAS DEL MÓDULO FV DE FORMA HORIZONTAL.

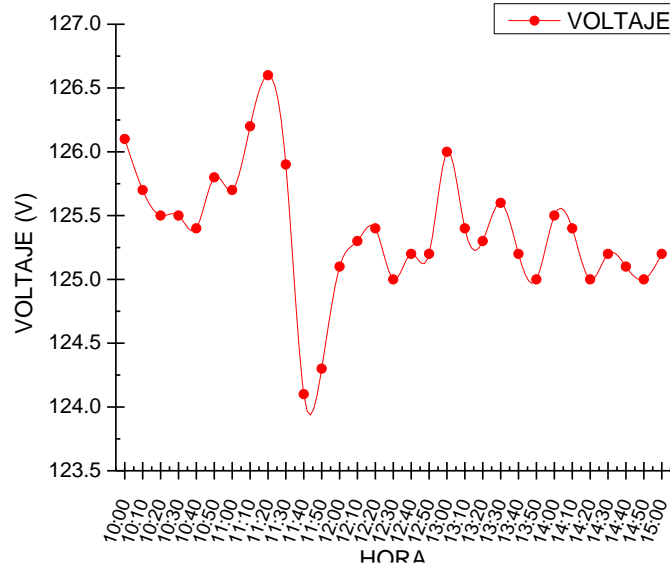


Gráfica 43 . Voltaje AC de salida del microinversor.

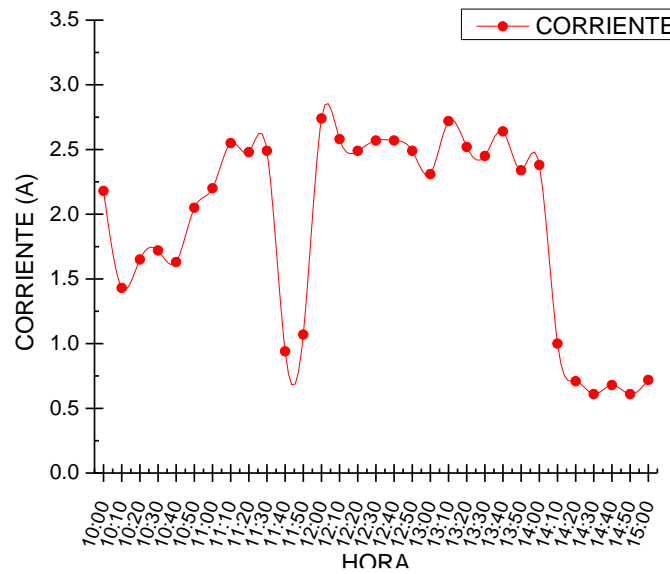


Gráfica 44. Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.

- CUBRIR UNA LÍNEA DE CELDAS DEL MÓDULO FV DE FORMA VERTICAL (LÍNEA VERTICAL DE CELDAS DEL EXTREMO DERECHO E IZQUIERDO).

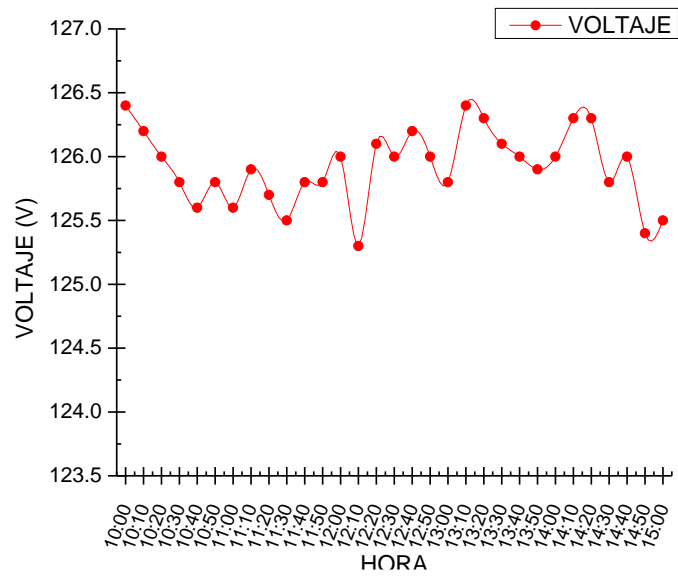


Gráfica 45. Voltaje AC de salida del microinversor.

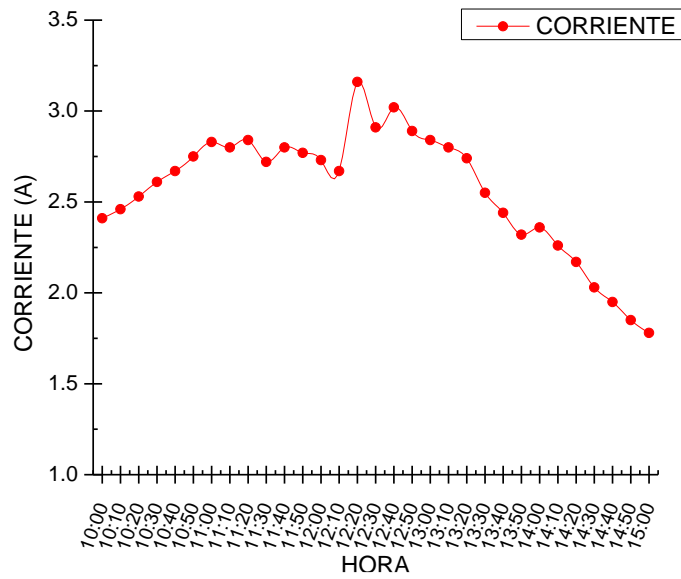


Gráfica 46. Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.

- PROYECCIÓN DE UNA LÍNEA SIMULANDO UN CABLE.

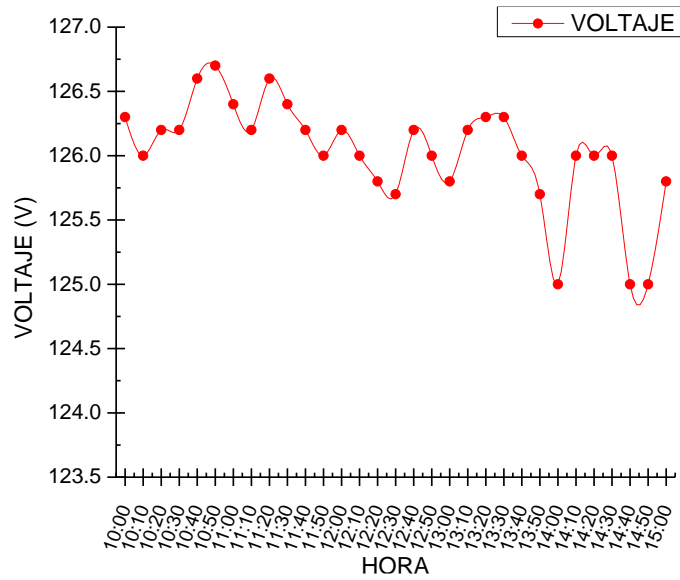


Gráfica 47. Voltaje AC de salida del microinversor.

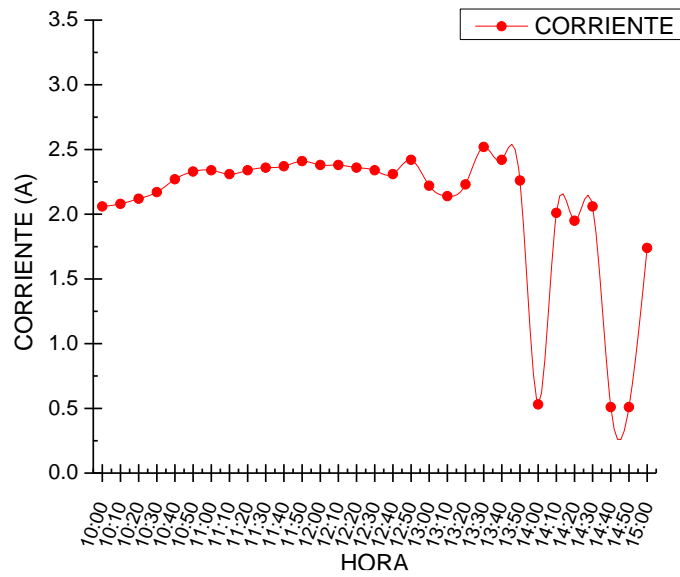


Gráfica 48. Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.

- PROYECCIÓN DE UNA SOMBRA SIMULANDO UNA VARILLA O TUBO.

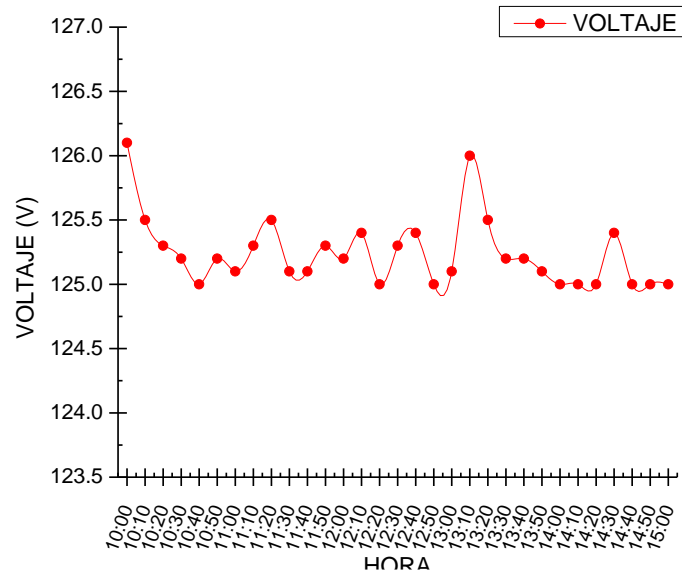


Gráfica 49. Voltaje AC de salida del microinversor.

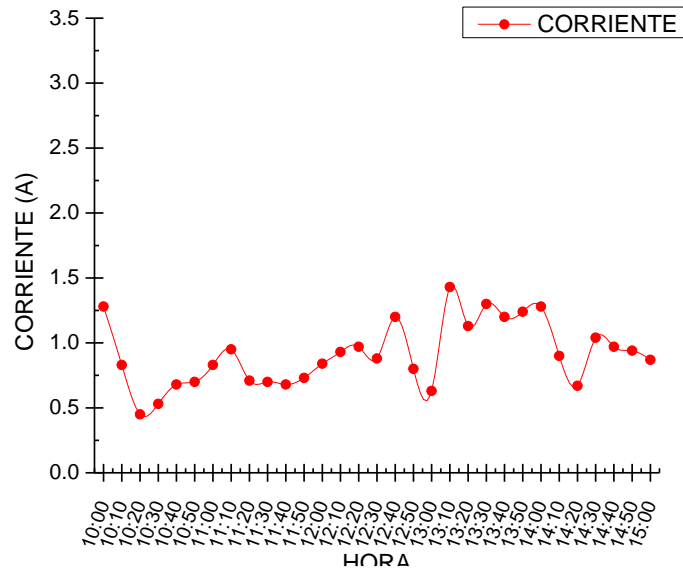


Gráfica 50. Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.

- CUBRIR LA MITAD DEL MÓDULO.

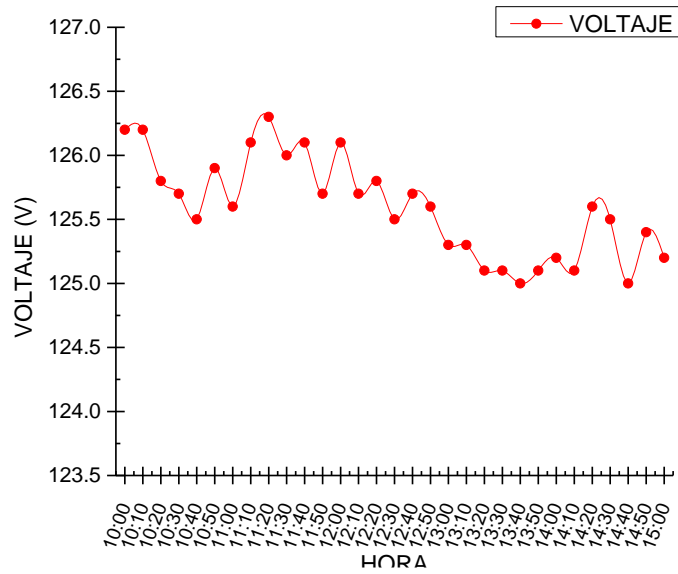


Gráfica 51. Voltaje AC de salida del microinversor.

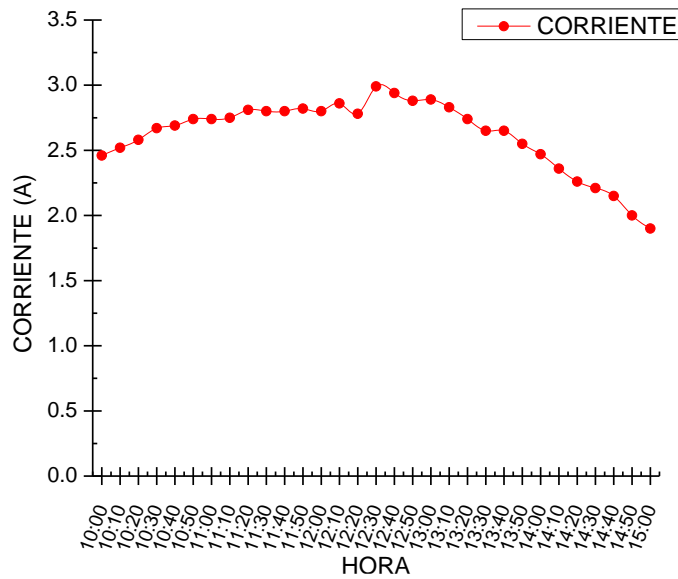


Gráfica 52. Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.

- SIMULACIÓN DE UNA MANCHA PEQUEÑA SIMILAR EL EXCREMENTO DE AVES.

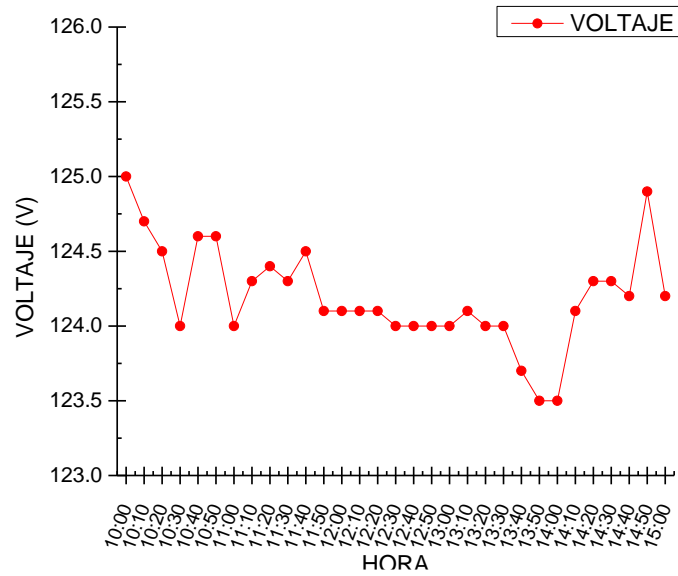


Gráfica 53. Voltaje AC de salida del microinversor.

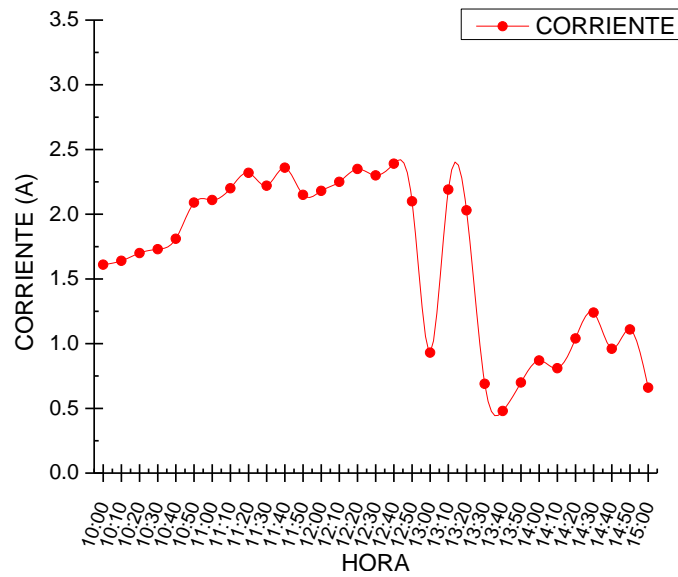


Gráfica 54 Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.

- PROYECCIÓN DE LA SOMBRA DE UNA RAMA.



Gráfica 55. Voltaje AC de salida del microinversor.



Gráfica 56. Intensidad de corriente AC de salida del microinversor.