

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA ELECTROMECAÁNICA



Tesis de Maestría

**INFLUENCIA DE SOMBRAS EN EL COMPORTAMIENTO
ENERGÉTICO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS**

Tesis de Maestría Presentada en Cumplimiento de los
Requisitos para la Obtención del Grado Académico de:
**MAGISTER SCIENTIARUM EN INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELECTROMECAÁNICA**

Autor: Ing. Cesar Colquehuanca Apaza

Asesor: MSc. Ing. Ricardo Paz Zeballos

Julio del 2021



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

INFLUENCIA DE SOMBRAS EN EL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

Por

Cesar Colquehuanca Apaza

Revisado y Presentado ante el Tribunal de Grado Académico

APROBADO:

MSc. Ing. Ricardo Paz Zeballos
Asesor de Tesis de Maestría

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA – ELECTROMECAÁNICA

Julio del 2021

INFLUENCIA DE SOMBRAS EN EL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

Por

Cesar Colquehuanca Apaza

Revisado y presentado ante Tribunal de Grado Académico:

APROBADO POR:

MSc. Ing. Ciro Levy Diaz

MSc. Ing. José Luis Hernández Quisbert

MSc. Ing. Edgar Tapia

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA – ELECTROMECAÁNICA

Julio del 2021

RESUMEN

El presente trabajo de investigación corresponde al estudio sobre el efecto que producen las sombras parciales a un panel solar; esto debido a una inadecuada instalación o mal mantenimiento al equipo, ya que las mismas repercuten en el normal funcionamiento y suministro de energía eléctrica.

Muchas regiones del territorio boliviano actualmente no cuentan con energía eléctrica proveniente de la red interconectada, según el Plan de la Universalización Bolivia con Energía¹. Por lo cual, el Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas menciona que hasta el 2020 aún no se podrá llegar a suplir esta necesidad energética, llegando únicamente al área urbana con el 97% y rural con el 70% de cobertura, estas últimas incluyen fuentes alternativas como ser paneles solares, turbinas eólicas y otros.

Recientemente, se inauguró la planta de generación de energía eléctrica de 5 MW, en el Departamento de Pando, Bolivia², la misma que suministra energía a lugares donde la red interconectada no llega; de esta manera, se estaría promoviendo la entrega de energía eléctrica por medio de paneles solares a ciudadanos del territorio boliviano.

Por otra parte, debido al elevado costo de los paneles solares, se hace necesario que todo consumidor cuente con un plan de mantenimiento adecuado, porque esto permitirá que dicho bien incremente su vida útil y que mejore su rendimiento.

También es necesario señalar que la existencia de objetos no deseados (desechos) que se pueda adherir a la superficie del panel, podrían causar sombras parciales, provocando de esta manera problemas en la captación de energía solar, pérdidas de energía eléctrica e inadecuado funcionamiento del sistema de panel fotovoltaico.

Para ello se desarrolló la siguiente investigación, que consiste en determinar de forma cuantitativa la influencia que producen las sombras parciales a un panel solar activo.

En la información obtenida se demostró que: la obstrucción de una celda fotovoltaica o, lo que es lo mismo, un sombreado parcial del 3 % del panel, produce una disminución en la generación de energía eléctrica del 81,10 %. Estos resultados fueron obtenidos a través de un diseño experimental factorial en el cual se determinó,

¹ Ministerio de Hidrocarburos y Energía, Plan de Universalización Bolivia con Energía 2010- 2025

² Estado plurinacional de Bolivia, Ministerio de Hidrocarburos y Energía, noviembre del 2014.

que la influencia significativa corresponde al porcentaje de sombras y la irradiación solar, esto con una significancia menor al 5% ($\alpha = 0,05$).

Finalmente, la tesis desarrollada será de mucha importancia para el personal técnico que realiza instalaciones, mantenimiento y calibración de sistemas fotovoltaicos. La información obtenida es desarrollada en la ciudad de La Paz, Bolivia, que se halla a 3452 msnm.

DEDICATORIA

A mis padres, por su gran esfuerzo al encaminarme a un futuro mejor.

AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS

A Dios, que es la luz y la fuerza en mi vida.

A mis queridos padres, quienes siempre me apoyaron en todas sus posibilidades.

A mi hermano, quien estuvo siempre apoyándome y alentándome.

Al ingeniero Ricardo Paz Z., por sus recomendaciones, sugerencias y apoyo incondicional para el desarrollo de esta investigación.

A los ingenieros: Ramiro Arce, José Luis Hernández, Ciro Levy y Edgar Tapia, por sus enseñanzas y directrices a lo largo de mi vida estudiantil.

A mis docentes, que me instruyeron durante todos mis estudios y fueron fuente de inspiración.

A mis compañeros de carrera y administrativos, por su enorme amistad y palabras de aliento para seguir adelante.

A todos ustedes muchas gracias.

Atentamente,

Ing. Cesar Colquehuanca Apaza

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenidos

RESUMEN.....	iv
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	Xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Originalidad.....	2
1.4. Relevancia.....	3
1.5. Interés.....	3
1.6. Factibilidad.....	4
1.7. Viabilidad.....	4
1.8. Pertinencia.....	4
1.9. Estado del arte.....	4
1.10. Hipótesis científica.....	6
1.11. Objetivos.....	6
1.11.1. Objetivo general.....	6
1.11.2. Objetivos específicos.....	6
1.12. Alcances.....	7
1.13. Límites.....	7
CAPÍTULO II.....	8
FUNDAMENTO TEÓRICO.....	8
2.1. Marco teórico.....	8
2.1.1. Energía solar en Bolivia.....	8
2.1.2. Paneles solares.....	10
2.1.3. Circuito equivalente.....	13
2.1.4. Curvas de voltaje-corriente y potencia-corriente.....	15

2.1.5. Ensayo en vacío y cortocircuito en paneles solares.....	16
2.1.6. Factores que influye en la potencia de un panel solar.....	17
2.1.7. Influencia de sombras en paneles solares.....	17
2.2. Planteamiento del problema.....	19
2.2.1. Formulación del problema.....	22
2.3. Sistema de variables.....	22
2.3.1. Conceptualización y operacionalización de variables.....	22
CAPÍTULO III.....	24
DISEÑO EXPERIMENTAL.....	24
3.1. Planteamiento del experimento.....	24
3.1.1. Implementación del equipo de recolección de datos.....	26
3.1.2. Método de experimentación.....	28
3.1.3. Selección del diseño experimental.....	29
3.1.4. Nivel de medición.....	30
3.1.5. Instrumentos de Investigación.....	31
3.1.6. Técnicas de recolección de datos.....	34
3.1.7. Técnicas de análisis.....	34
3.2. Selección de factores para el modelo planteado.....	34
3.2.1. Factores de entrada.....	35
3.2.2. Factores de salida.....	37
3.3. Factores controlables e incontrolables.....	37
3.3.1. Factores controlables.....	37
3.3.2. Factores incontrolables.....	38
3.4. Uso de software para el diseño experimental.....	40
CAPÍTULO IV.....	41
EVALUACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS EXPERIMENTALES.....	41
4.1. Medición y experimentación.....	41
4.2. Tratamiento de datos.....	42
4.3. Validación.....	44
4.3.1. Validación del modelo.....	44
4.3.2. Validación de los supuestos estadísticos.....	47
4.4. Influencia de los factores.....	48
4.4.1. Análisis de la influencia de sombra.....	48
4.4.2. Análisis de la influencia de la radiación solar.....	51

4.4.3. Análisis sobre la combinación de los factores.....	54
4.4.4. Análisis por superficie de respuesta.....	55
CAPÍTULO V.....	57
RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	57
5.1. Resultados sobre la influencia de sombras parciales en paneles solares fotovoltaicos.....	57
CAPÍTULO VI.....	61
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
6.1. Conclusiones.....	61
6.2. Recomendaciones.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	63
PÁGINAS WEB UTILIZADAS.....	65
ANEXOS.....	A-1
ANEXO A.....	A-1
Datos técnicos.....	A-1
Datos técnicos del panel solar.....	A-2
Plan de mantenimiento.....	A-4
ANEXO B.....	A-6
Mediciones.....	A-6
Medidas experimentales.....	A-7
Distorsión de curvas del panel por efecto de sombras parciales a una célula.....	A-8

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1.1: Pérdida de energía eléctrica por sombras parciales en un panel solar.....	2
Figura N° 2.1: Instalación de paneles solares en territorio Boliviano.....	9
Figura N° 2.2: Mapa de radiación solar para Bolivia.....	9
Figura N° 2.3: Instalación de paneles solares en viviendas del territorio Boliviano.....	10
Figura N° 2.4: Esquema de funcionamiento de una célula solar.....	11
Figura N° 2.5: Célula solar.....	12
Figura N° 2.6: Circuitos equivalentes de una celda solar.....	14
Figura N° 2.7: Curva I-V y P-V para un módulo fotovoltaico típico a 1000 W/m ²	15
Figura N° 2.8: Circuito de ensayo en paneles solares.....	17
Figura N° 2.9: Modulo solar.....	17
Figura N° 2.10: Lado izquierdo presencia aves y lado derecho hojas caídas.....	18
Figura N° 2.11: Ubicación deficiente de paneles fotovoltaico.....	18
Figura N° 2.12: Panel fotovoltaico que presenta una celda defectuosa.....	19
Figura N° 2.13: Presencia de sombras por desechos depositados.....	20
Figura N° 2.14: Sombras total y parcial producto de una mala instalación.....	20
Figura N° 2.15: Efecto de las sombras en paneles solares.....	21
Figura N° 2.16: Problemas de calentamiento en celda y caja de conexiones.....	21
Figura N° 2.17: Diagrama de bloques del diseño experimental.....	23
Figura N° 3.1: Lugar de experimentación en los predios del IIME.....	24
Figura N° 3.2: Esquema del equipo de recolección de datos.....	25
Figura N° 3.3: Flujograma para la recolección de datos.....	26
Figura N° 3.4: Equipo de recolección de datos.....	27
Figura N° 3.5: Flujograma de la etapa de diseño experimental.....	28
Figura N° 3.6: Clasificación de los diseños experimentales.....	29
Figura N° 3.7: Diagrama de bloques del diseño experimental.....	35
Figura N° 3.8: Gráfica para la selección de niveles de sombra.....	36
Figura N° 3.9: Comportamiento de la nubosidad en día específico.....	38
Figura N° 3.10: Comportamiento de la nubosidad en día específico.....	39
Figura N° 3.11: Paquete computacional Design Expert V 7.0.1.....	40
Figura N° 4.1: Sumario de datos para evaluación.....	44
Figura N° 4.2: Gráfica de transformación de una función de potencia.....	45
Figura N° 4.3: Análisis de factores incluidos en el modelo.....	45
Figura N° 4.4: Cumplimiento de los supuestos.....	47

Figura N° 4.5: Potencia eléctrica vs sombras parciales.....	49
Figura N° 4.6: Potencia eléctrica vs radiación solar.....	53
Figura N° 4.7: Factores combinados.....	55
Figura N° 4.8: Superficie de respuesta.....	56
Figura N° 5.1: Decremento de la potencia vs sombras parciales en el panel solar.....	58
Figura N° 5.2: Pérdidas de potencia vs sombras parciales en el panel solar.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 2.1: Placa de fabricante de un módulo solar VLX – 53.....	16
Tabla N° 3.1: Clasificación de los niveles de medición.....	30
Tabla N° 3.2: Datos técnicos del piranómetro.....	31
Tabla N° 3.3: Datos técnicos de la resistencia eléctrica.....	32
Tabla N° 3.4: Datos técnicos del voltímetro amperímetro.....	32
Tabla N° 3.5: Datos técnicos del sensor de corriente.....	33
Tabla N° 3.6: Niveles del factor de sombras parciales.....	36
Tabla N° 3.7: Niveles del factor radiación solar global.....	37
Tabla N° 4.1: Medidas experimentales.....	41
Tabla N° 4.2: Medidas experimentales y aleatorización de datos.....	43
Tabla N° 4.3: Análisis de varianza (Tabla de Anova).....	46
Tabla N° 4.4: Desviación estándar y estadístico del modelo.....	46
Tabla N° 5.1: Potencias solares en función de la radiación solar y sombras.....	57
Tabla N° 5.2: Pérdidas de potencia en función de la radiación solar y sombras.....	59



CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1 Introducción

El continuo uso de combustibles fósiles y otros productos industriales utilizados en la producción de energía eléctrica han llevado al incremento acelerado de emisiones de CO₂, las cuales están produciendo un aumento en la temperatura de la tierra conocido como el Calentamiento Global. El uso de energías renovables, tales como: energía solar fotovoltaica, eólica y otras, permite establecer fuentes de energía eléctrica con efectos menos nocivos para el medio ambiente en comparación a las fuentes tradicionales.

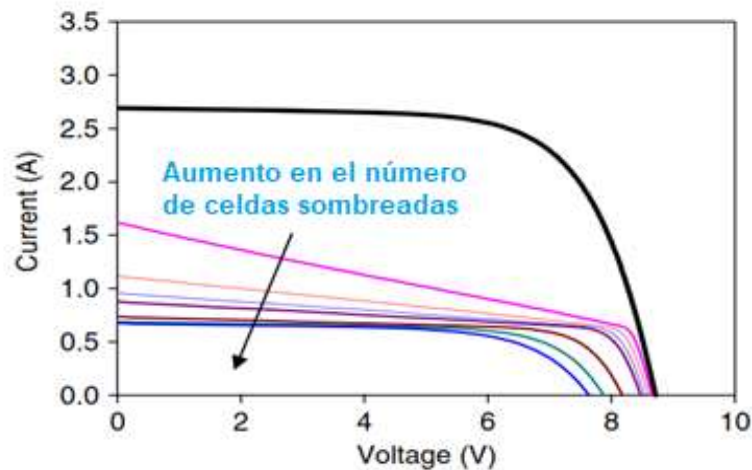
Según indican los mapas solares existentes, se tiene un amplio recurso solar en Bolivia. Las mismas que se encuentra en los trópicos y el altiplano donde las horas de sol por día son relativamente uniformes durante todo el año. En especial en las zonas mucho más elevadas como el altiplano del país donde reciben un promedio de 6 horas de sol diario durante casi nueve meses del año y además se encuentran aproximadamente el 35% de la población y por su elevación sobre el nivel del mar gran parte de la radiación es directa (Vargas, 2014).

También se ha demostrado que los paneles solares fotovoltaicos son una solución de fondo económicamente ventajosa para el suministro de electricidad a escuelas, consultorios médicos de la familia, salas de televisión, círculos sociales, y otros, así como a viviendas de campesinos en lugares aislados, que son por lo general de difícil acceso y están alejados del sistema eléctrico interconectado.

El objeto de la presente investigación se centra principalmente en el efecto que puede traer la existencia de sombras parciales en un panel solar.

En la Figura N°1.1, se observa cómo la influencia de sombras provoca una distorsión en la curva I vs V, la misma repercute en un decremento en la generación de energía eléctrica producido por un panel solar.

Figura N° 1.1: Pérdida de energía eléctrica por sombras parciales en un panel solar.



Fuente: Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays.

1.2. Justificación

Según el censo realizado el 2012³, se evidencia que la red de energía eléctrica no cubre todo el territorio Boliviano, en especial los sectores rurales, debido a distintos factores como ser: distancias muy extremas, falta de caminos, cantidad de familias reducidas y otros, razones que determinan la instalación de paneles solares en estos lugares donde se requiere de suministro de la energía eléctrica.

Una de las desventajas que se tiene en el uso de estos equipos, es la inadecuada instalación y/o mantenimiento, haciendo que los paneles solares operen de forma ineficiente y, como consecuencia de ello, se provoquen daños irreversibles a estos equipos.

El presente trabajo proporciona información acerca de la influencia que generan las sombras parciales en los paneles solares. Para informar y comunicar este conocimiento a las partes interesadas.

1.3. Originalidad

Contar con suministro de energía eléctrica es de mucha importancia para el vivir bien del ciudadano boliviano, con referencia a: acceso a la información, salud, protección, seguridad y otros. La falta de conocimiento y una mala capacitación en el cuidado a

³ Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas, Plan para el desarrollo de las energías alternativas, Pagina 24.



los equipos fotovoltaicos que suministran energía eléctrica, llevan a una pérdida total de dicho bien.

La información bibliográfica sobre el tema no es accesible en nuestro país y su existencia es mínima, por ello esta investigación será de mucha importancia en la generación de conocimiento en esta área.

Es necesario resaltar que estos equipos que suministran energía eléctrica, son contruidos en otros países y sus pruebas de funcionamiento son llevadas a cabo en condiciones ambientales diferentes al de nuestro país. Por lo tanto, será de mucha utilidad la información que se obtenga acerca de la influencia de sombras en paneles solares fotovoltaicos estudiados en la Ciudad de La Paz que se encuentra a 3452 msnm, una densidad de aire menor y una irradiación solar elevada.

1.4. Relevancia

La investigación se enfoca en los cuidados que deben tener los usuarios de paneles solares fotovoltaicos, que, por falta de conocimiento, pueden provocar deterioros e inutilización de dichas fuentes de suministro de energía eléctrica.

El uso de estos sistemas fotovoltaicos se está utilizando cada vez en mayor proporción. Por ejemplo, en países como Alemania, más del 50%⁴ de sus habitantes cuentan con este beneficio considerando que su nivel de irradiación es menor al territorio boliviano.

Esta fuente de energía puede ser aprovechada para superar los problemas de racionamiento y corte eléctrico que ha experimentado Bolivia desde 2011⁵, hasta el presente.

1.5. Interés

La obtención de información relacionada a las curvas de funcionamiento de un panel solar operando en condiciones ambientales diferentes al país de procedencia, es de mucho interés. Esto permite que el proyectista realice modificaciones en el uso o instalación de estos paneles, y a la vez tendrá el conocimiento comprobado experimentalmente acerca de la existencia de obstáculos u otros objetos (p. ej. hojas

⁴ <http://www.accionpreferente.com/mundo/alemania-produce-la-mitad-de-su-energia-a-traves-de-energia-solar/>

⁵ Declaraciones del Comité Nacional de Despacho de Carga en marzo de 2011 (CNDC)



de árboles, ramas, desechos de aves y otros) que provoca una disminución en la generación de energía eléctrica y en un caso extremo el posible deterioro del equipo.

1.6. Factibilidad

En colaboración con el Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánica de la Universidad Mayor de San Andrés, en el préstamo de equipos y el uso de instrumentación, la investigación es factible y posible de realizarse.

1.7. Viabilidad

Por tratarse de un proyecto de investigación que fue llevado a cabo en el Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánica de la Universidad Mayor de San Andrés, con las características de no originar perjuicios a los estudiantes que transitan, y de generar resultados que coadyuve a mejora el uso adecuado de estos equipos se puede indicar que el proyecto es viable.

1.8. Pertinencia

La obtención de las curvas en función del tipo de sombra que puede presentarse es de mucha importancia para el proyectista. Esto consiste en proveer información precisa sobre la importancia que tiene la ubicación de estos paneles solares, los cuales suministrarán energía eléctrica a uno o varios consumidores.

Es importante mencionar que la toma de datos se la realizó de manera rápida, caso contrario se tendría que interactuar con otro fenómeno incontrolable que es la temperatura. Para ello se utilizó el equipo de recolección de datos, que cuenta con un sensor de tensión y de corriente, posteriormente dicha información se almacenó, analizó e interpretó.

A medida que en el país se va entendiendo la importancia del uso de estos equipos, se hace necesario el cómo se los debe instalar, usar y mantener adecuadamente. Es por ello que la investigación será de mucha utilidad para los usuarios de los paneles solares fotovoltaicos.

1.9. Estado del arte

Con referencia a la investigación realizada en la Ciudad de La Paz – Bolivia, no se tiene ningún estudio sobre influencias de sombras parciales en paneles solares



fotovoltaicos. Las pocas referencias halladas respecto a dicho tema de investigación corresponden a otros países; las mismas se detallan a continuación:

- Para el tema titulado “**Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays**”. Por: M.C. Alonso-Garcia, J.M. Ruiz, W. Herrmann. Se menciona cómo tienen efecto las sombras parciales en un panel solar; dicho efecto difiere si las células sombreadas están lado a lado o separadas.
- Con referencia al tema titulado “**Experimental study of mismatch and shading effects in the I–V characteristic of a photovoltaic module**”. Por: M.C. Alonso-Garcia, J.M. Ruiz, F. Chenlo. Señala que las pérdidas de energía eléctrica son causadas por interconexiones de células solares y por efecto de sombras parciales en un panel solar.
- El tema titulado “**Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico**” Por: Palleja Cabre Jordi, Estados Unidos. El autor señala la importancia que tienen las sombras en un panel solar, las mismas son reflejadas en la disminución de la corriente eléctrica que origina la pérdida de potencia en todo el panel fotovoltaico.
- Para el tema titulado “**Coefficiente de rendimiento - Factor de calidad de la instalación fotovoltaica**” Por: Información técnica SMA. El coeficiente de rendimiento constituye una de las magnitudes más importantes para la evaluación de la efectividad de una instalación fotovoltaica.

En concreto, el coeficiente de rendimiento expresa la relación del rendimiento energético real con respecto al rendimiento energético teóricamente posible. Este coeficiente es prácticamente independiente de la orientación de una instalación fotovoltaica y de la irradiación solar que incide sobre ella. Por este motivo, con ayuda del coeficiente de rendimiento, es posible comparar instalaciones fotovoltaicas conectadas a red en diferentes lugares del mundo.

- Con referencia al tema titulado “**Pérdidas en Instalaciones solares fotovoltaicas**”. Por: Cugar – Sistemas especiales S.L. Menciona que se tienen diferentes pérdidas de energía eléctrica las mismas dependen de la fabricación, el efecto climático o la mala utilización.



- Al tema titulado “**Los captadores solares y la sombra**” Por: Luis Bérriz Pérez⁶, Cuba. El autor señala que se tiene un 90% de pérdidas de energía eléctrica en un panel solar, debido a un 10% de sombras parciales del panel. Es importante señalar que los resultados obtenidos son realizados en el país de procedencia, que es Cuba.

1.10. Hipótesis científica

La influencia de sombras parciales sobre paneles solares fotovoltaicos produce una disminución considerable en la generación de la energía eléctrica.

1.11. Objetivos

1.11.1. Objetivo general

Comprobar que la presencia de sombras parciales en un panel solar influye de forma significativa en el comportamiento energético de los paneles fotovoltaicos disminuyendo de esta manera la generación de energía eléctrica.

1.11.2. Objetivos específicos

- Comprobar que la influencia de sombras parciales en un panel solar, mediante la obstrucción de células fotovoltaicas provoca deficiencias en el suministro de energía eléctrica.
- Cuantificar la pérdida de potencia en un panel solar con una célula sombreada al 100%.
- Determinar el grado de sombra más crítica que puede tener un panel solar.
- Seleccionar un método de experimentación para la mejor interpretación de resultados.
- Demostrar la importancia que requiere un mantenimiento rutinario a los paneles solares

⁶Doctor en Ciencias Técnicas. Presidente de CUBASOLAR. Autor del libro *Secadores solares para productos agropecuarios e industriales* y autor del *Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares*.



1.12. Alcances

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación fueron para un panel solar de 55 W. monocristalino, proporcionado por el Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánica de la Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ingeniería.

La investigación se ha realizado en la Ciudad de La Paz, Bolivia y en condiciones controladas.

1.13. Límites

La investigación está limitada al estudio de un panel solar en condiciones reales y controladas, en ambientes del Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánica, IIME, de la Universidad Mayor de San Andrés. Para ello se usa el panel fotovoltaico, BP SOLAR con las siguientes características:

Module Type	: BSK- 55 Wp
Potencia Nominal Pico (P _{máx})	: 55.00 W
Potencia Mínima (P _{mín})	: 50.00 W
Voltaje máximo de pico (V _{pm})	: 17.00 V
Corriente máxima de pico (I _{mp})	: 3.22 A



CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Marco teórico

2.1.1 Energía solar en Bolivia

Hoy en día el consumo de energía se ha vuelto un factor básico para muchos aspectos de la actividad diaria y el progreso. Por ende, la energía es imprescindible para el progreso de un país, tanto es así que la tasa de consumo energético está muy relacionada con el grado de desarrollo económico. Esta es la razón por la cual las energías renovables, o verdes, están en alta demanda ya que su utilización no produce emisiones contaminantes para el medio ambiente y se obtienen a partir de fuentes naturales que son virtualmente inagotables, siendo el sol la más importante de ellas. Gracias a esta alternativa se prevé para un futuro no muy lejano, una creciente disminución en la dependencia de las fuentes tradicionales de energía obtenidas a partir de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural).

Para ello, se debe continuar fomentando el uso de este tipo de energías, ya que así se podrá mantener al planeta en armonía con la naturaleza y por consiguiente la extensión de las condiciones favorables para que permanezca habitable a largo plazo, además de subrayar la amenaza del cambio climático. Es en este sentido que la energía solar es propuesta como una fuente de energía alternativa y sustentable.

Respecto a la cobertura eléctrica en el país, se informa, que aumento el consumo eléctrico desde el año 1990 al 2018, esto debido al creciente número de la población la misma que es de 11 millones de habitantes aproximadamente, de los cuales el 67,3% vive en zonas urbanas y el 32,7% en zonas rurales (Instituto Nacional de Estadística, 2018). Y que la tasa de electrificación aumentó en las últimas décadas, del 55% en 1990 a cerca del 90% en 2018 (Ministerio de Hidrocarburos y energía, 2014).

Según la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE) presentó el 18 de enero, en la ciudad de Sucre, su informe de Gestión 2018 denominado “Audiencia Final de Rendición Pública de Cuentas 2018”, en que se destacó que la cobertura de los servicios eléctricos en Bolivia es mayor a 91% y que se prevé llegar al 100% hasta 2025. Y el presidente de la empresa Joaquín Rodríguez, señaló que la cobertura eléctrica en el área urbana llegó a 99% y en las zonas rurales a 80% (Toledo, 2019).



Debido a la gran demanda de energía eléctrica en el territorio boliviano se han promovido proyectos como la planta de energía solar en Cobija de 5 MW de potencia. Ver Figura N°2.1.

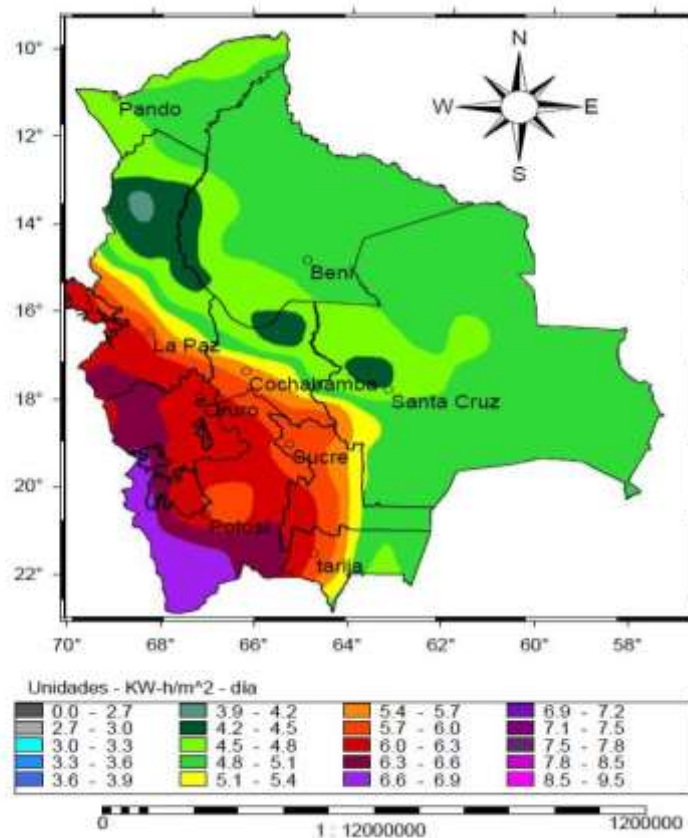
Figura N° 2.1: Instalación de paneles solares en territorio Boliviano



Fuente: Google Imágenes Instalación de paneles solares en Cobija, Bolivia

El interés gubernamental en la energía solar se ha incrementado en los últimos años debido a que la intensidad de la radiación solar en territorio nacional es alta y puede ser explotada de forma eficiente y también es viable, ver Figura N° 2.2.

Figura N° 2.2: Mapa de radiación solar para Bolivia



Fuente: Universidad Mayor de San Simón, 2010



Los sistemas solares de producción de energía eléctrica, son una manera útil de proveer electricidad sin necesidad de extender la red.

Para ello, se promueve la instalación de paneles solares para satisfacer estas necesidades básicas en territorio Boliviano. Ver Figura N° 2.3.

Figura N° 2.3: Instalación de paneles solares en viviendas del territorio Boliviano



Fuente: Google Imágenes paneles solares en viviendas campesinas

2.1.2. Paneles solares

Energía solar fotovoltaica

La Energía solar fotovoltaica es una forma de obtención de energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos.

Los paneles, módulos o colectores fotovoltaicos están formados por dispositivos semiconductores tipo diodo que, al recibir radiación solar, se excitan y provocan saltos electrónicos, generando una pequeña diferencia de potencial en sus extremos. El acoplamiento en serie de varios de estos fotodiodos permite la obtención de voltajes mayores en configuraciones muy sencillas y aptas para alimentar pequeños dispositivos electrónicos.

A mayor escala, la corriente eléctrica continua que proporcionan los paneles fotovoltaicos se puede transformar en corriente alterna e inyectar a la red. Operación que es rentable económicamente pero que precisa todavía de subvenciones para una mayor viabilidad. En entornos aislados, donde se requiere poca potencia eléctrica y el acceso a la red, es difícil, como estaciones meteorológicas o repetidores de comunicaciones, se emplean las placas fotovoltaicas como alternativa económicamente viable.



La célula solar

La célula solar es uno de los elementos que forma parte un panel fotovoltaico, está encargado de convertir los fotones procedentes del sol en una corriente eléctrica que circulará por el elemento externo a la célula, la carga.

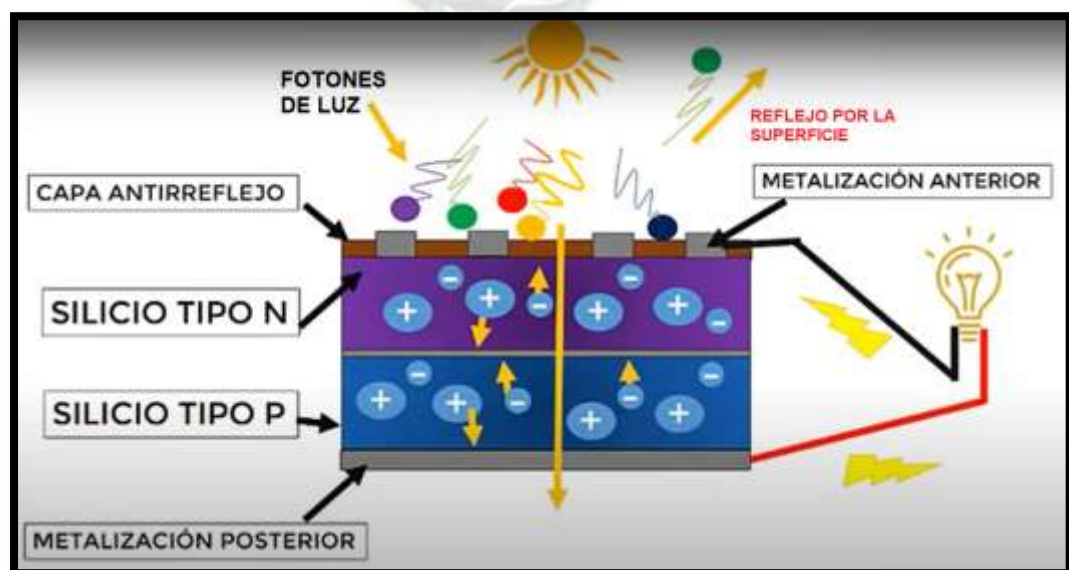
Los fotones serán los que formarán, al romper el enlace, los pares electrón-hueco y, gracias al campo eléctrico producido por la unión p-n, se separarán antes de poder recombinarse, generándose así la corriente eléctrica.

No todos los fotones son aprovechados para la generación de corriente, algunos de ellos simplemente son desaprovechados por la incapacidad de la célula para absorberlos, y otros pueden ser reflejados por la superficie. Ver Figura N° 2.4.

La unión p-n, y los correspondientes contactos eléctricos proporcionan el camino de circulación de la corriente de electrones, que recorrerá el circuito exterior y regresará a la célula; esta corriente provoca una caída de tensión en la resistencia externa que está conectada a los bornes de la célula, lo que implica que ésta debe operar a una tensión V .

La resistencia de carga, junto con la resistencia interna de la célula, no deben ser demasiado elevadas, ya que aumentaría demasiado la tensión, e impediría los procesos de generación y por consiguiente la circulación de la corriente.

Figura N° 2.4: Esquema de funcionamiento de una célula solar

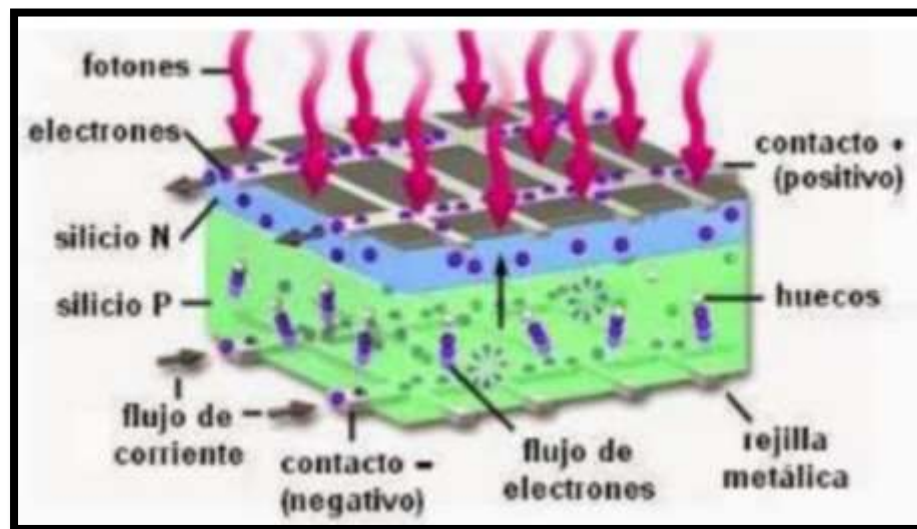


Fuente: <https://eliseosebastian.com/efecto-fotovoltaico-en-un-panel-solar/>

El módulo Solar

Los módulos fotovoltaicos están compuestos por células solares; éstas comúnmente se fabrican de silicio ya que este material existe en gran abundancia en la tierra, cuenta con una baja tasa de contaminación, presenta una alta durabilidad en el tiempo y cuenta con sobresalientes propiedades fisicoquímicas (Nogueira et al, 2015). Ver Figura N° 2.5.

Figura N° 2.5: Célula solar



Fuente:

<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/4196/cepedajuan2017.pdf?sequence=1>

Características eléctricas de un panel fotovoltaico o módulo solar

a) Corriente de cortocircuito (I_{cc})

Intensidad de corriente eléctrica que circula con la celda en cortocircuito, con una iluminación determinada y fija. Su valor es directamente proporcional a la energía solar recibida, y por lo tanto a la superficie total y al nivel de iluminación.

b) Tensión de vacío (V_{co})

Diferencia de potencial entre los bornes de la celda en ausencia de consumo, con una iluminación fija y a una temperatura determinada. Su valor depende de la junta utilizada y varía muy poco con la intensidad luminosa.

**c) Corriente óptima (I_m)**

Intensidad de corriente que circula por la celda en el punto de funcionamiento óptimo, teniendo aplicada una carga (R_m) de valor óptimo, elegida de modo que la potencia eléctrica sea máxima.

d) Tensión óptima (V_m)

Tensión que origina la corriente óptima, al ser aplicada sobre una carga R_m de valor óptimo, elegida de modo que la potencia eléctrica sea máxima.

e) Potencia máxima (P)

Máxima energía que es entregada por una celda solar cuando pasa por un valor máximo para valores determinados de tensión y corriente fijados en función de la resistencia óptima de carga (R_m). Su unidad de medición es el Watt (W).

e) Temperatura óptima de funcionamiento ($^{\circ}\text{C}$)

Magnitud alrededor de los 25 grados centígrados⁷.

f) Rendimiento (η)

Relación entre la energía eléctrica entregada y la energía luminosa recibida. Su valor está por el 19,60 %⁸, según la tecnología constructiva de la celda.

2.1.3. Circuito equivalente

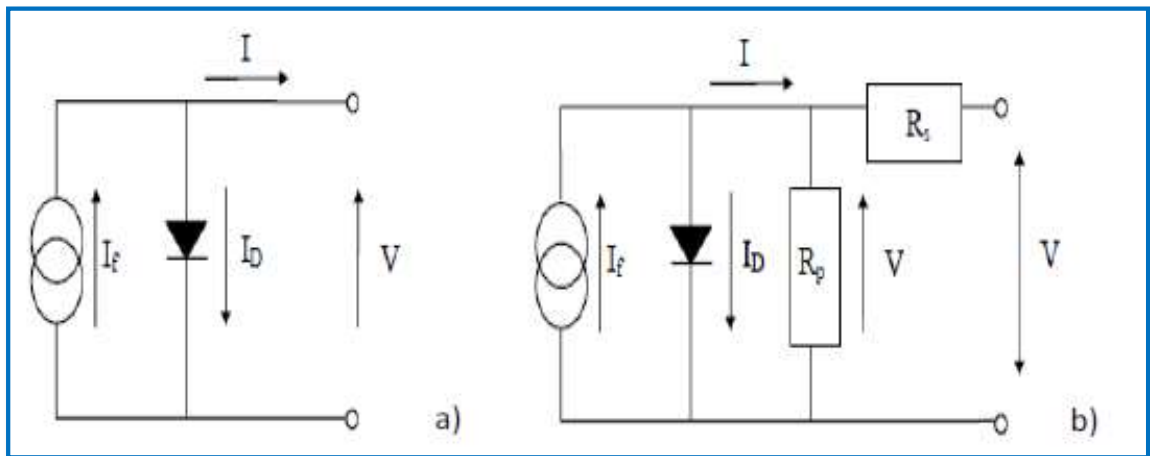
El comportamiento de una celda solar puede ser descrito con un diagrama equivalente que está formado, en un principio, por un diodo de unión p-n y por una fuente de corriente foto generada (I_f). No obstante, en una celda solar real están presentes otros elementos tales como la resistencia en serie R_s y la resistencia en paralelo R_p . R_s proviene principalmente de la resistividad del emisor n, de la base p, de las resistencias de contactos entre el semiconductor, de los contactos metálicos y de la resistencia de la metalización frontal. La segunda es esencialmente debida a pérdidas en los bordes y a la presencia de defectos cristalinos y precipitado de impurezas en la zona de juntura (Barrera, 2009).

⁷https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/08_lecciones/02_leccion/www/Modulo_fotovoltaico.htm

⁸ <https://www.energynews.es/los-10-paneles-solares-mas-eficientes/>

En la Figura N° 2.6, se aprecian los circuitos equivalentes, ideal (a) y real (b).

Figura N° 2.6: Circuitos equivalentes de una celda solar



Fuente: Barrera, 2009

La ecuación⁹ que describe adecuadamente el comportamiento eléctrico de la mayoría de las células solares es:

$$I = I_f - I_0 \left(e^{\frac{V + I_1 R_s}{m V_t}} - 1 \right) - \frac{V + I_1 R_s}{R_p} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

I_f = corriente fotogenerada (A)

I_0 = corriente de saturación del diodo o corriente de oscuridad (A)

I_1 = corriente eléctrica suministrada por la celda solar (A)

R_s = resistencia serie (Ω)

m = factor de idealidad del diodo

R_p = resistencia paralelo (Ω)

V_t = voltaje térmico (KT/q)¹⁰

⁹ Ecuación del modelamiento de una célula solar por:

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10250/1/UPS-GT001338.pdf>

¹⁰ K es la constante de Boltzman ($1.380\ 64 \times 10^{-23}$ J/K.). T la temperatura de la celda y q la carga del electrón.



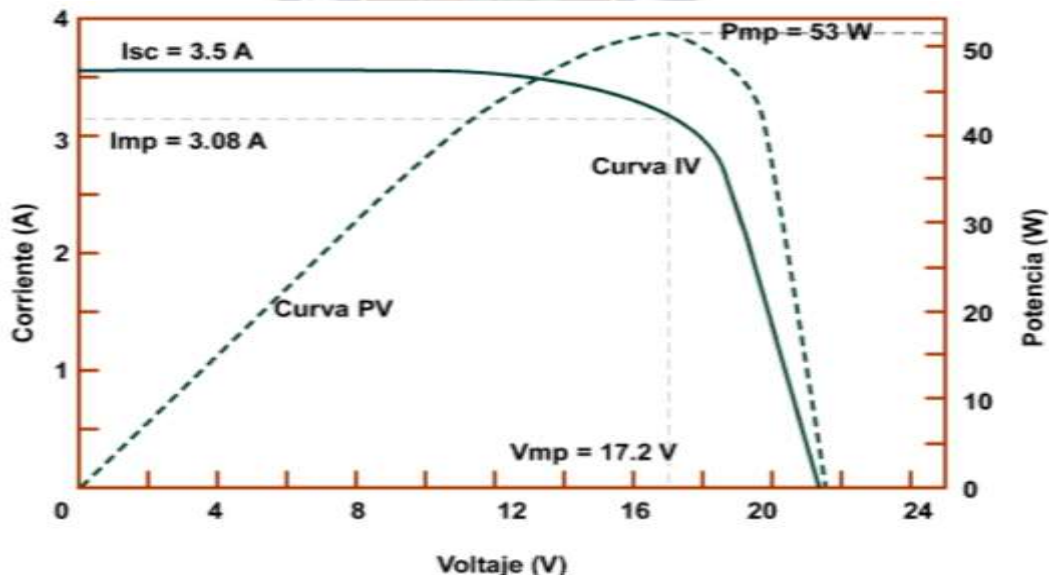
2.1.4. Curvas de Corriente-Voltaje y Potencia- Voltaje

Las curvas de corriente voltaje

El comportamiento eléctrico de los módulos está dado por las curvas de corriente contra voltaje (curva I-V) o potencia contra voltaje (curva P-V) que los caracteriza.

La curva de potencia se genera multiplicando la corriente y el voltaje en cada punto de la curva I-V. La Figura N° 2.7, muestra las curvas I-V y P-V para un módulo fotovoltaico típico. Bajo condiciones estándares de prueba (radiancia de 1kW/m^2 y temperatura de celda de 25°C), cada modelo de módulo tiene una curva I-V (o P-V) característica. En la curva de potencia contra voltaje, la potencia máxima (P_p) es la capacidad nominal o tamaño del módulo. La corriente y el voltaje en el punto de máxima potencia (I_p y V_p) corresponden a la corriente nominal y voltaje nominal del módulo, respectivamente. Otros parámetros de importancia son la corriente de corto circuito (I_{cc}) y el voltaje de circuito abierto (V_{ca}). Es importante notar que, cuando el módulo opera lejos del punto de máxima potencia, el valor se reduce significativamente.

Figura N° 2.7: Curva I-V y P-V para un módulo fotovoltaico típico a 1000 W/m^2 y 25°C



Fuente: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/4196/cepedajuan2017.pdf>

Cada módulo tiene en su parte posterior una placa del fabricante con el modelo y las especificaciones eléctricas tal como se muestra en la Tabla N° 2.1.

Tabla N° 2.1: Placa del fabricante de un módulo solar fotovoltaico

**Electrical characteristics**

P_{max}, V_{oc}, I_{sc}, V_{mp} and I_{mp} at STC (1000W/m², 25°C, AM 1.5);

	225W	230W	235W	240W	245W	250W	255W	260W
Maximum Power (P _{max})								
Open Circuit Voltage (V _{oc})	36.8V	36.9V	37.0V	37.1V	37.2V	37.3V	37.4V	37.5V
Short Circuit Current (I _{sc})	8.16A	8.31A	8.42A	8.52A	8.62A	8.72A	8.82A	8.91A
Maximum Power Voltage (V _{mp})	30.1V	30.2V	30.3V	30.3V	30.4V	30.5V	30.6V	30.7V
Maximum Power Current (I _{mp})	7.48A	7.62A	7.76A	7.92A	8.06A	8.20A	8.34A	8.48A
Module Efficiency (%)	13.8	14.1	14.4	14.7	15.0	15.3	15.6	15.9

Temperature Coefficients

Temperature Coefficients of P _{max}	-0.43 %/°C
Temperature Coefficients of V _{oc}	-0.33 %/°C
Temperature Coefficients of I _{sc}	+0.056 %/°C

Absolute Maximum Limits

Maximum System Voltage	1000V DC
Module Operating Temperature	-40°C to +85°C
NOCT	45°C±2°C

Fuente: <https://tecnosolab.com/noticias/caracteristicas-electricas-de-los-paneles-solares>

Cada placa es única y muestra las características eléctricas que tiene un panel solar fotovoltaico.

2.1.5. Ensayo en vacío y cortocircuito en paneles solares

El ensayo en vacío, consiste en quitar toda carga al panel solar activo; de esta manera se determinará la tensión en bornes del panel.

Donde se obtiene:

$$V_{ab} = V_{max}$$

$$I = 0 \text{ A}$$

El ensayo de cortocircuito, consiste en cortocircuitar (unir) los bornes del panel solar activo para hallar, de esta manera, la máxima corriente de circulación.

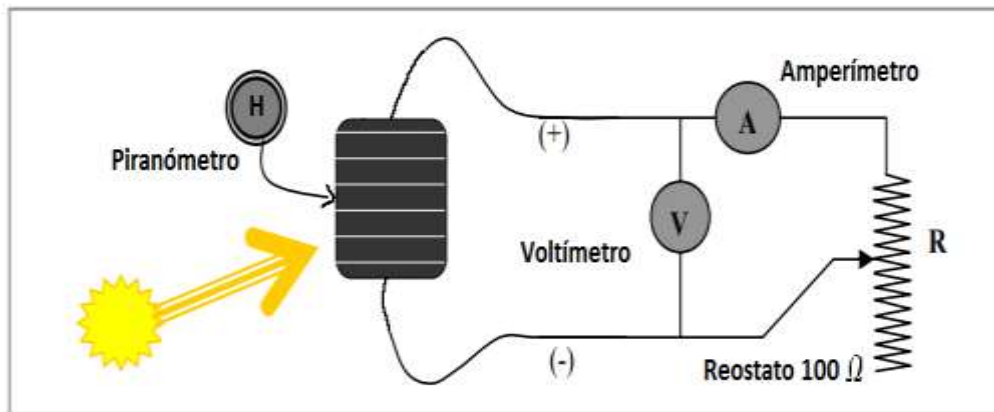
Donde se obtiene:

$$V_{ab} = 0 \text{ V}$$

$$I = I_{max}$$

Para ello se hace uso del siguiente circuito que corresponde a la Figura N° 2.8.

Figura N° 2.8: Esquema del circuito para obtener la curva I vs V de una célula fotovoltaica



Fuente: Elaboración Propia

2.1.6. Factores que influyen en la potencia de un panel solar

Varios factores influyen en la potencia de un panel solar, tales como: la radiación directa, la radiación difusa, el ángulo de incidencia de la radiación, la situación geográfica, la temperatura, el polvo, las sombras y otros.

En el tema de investigación se considera el efecto que producen las sombras parciales en un panel fotovoltaico.

2.1.7. Influencia de sombras en paneles solares

El fenómeno se presenta cuando en una instalación de paneles solares no se toma en cuenta la presencia de sombras, tales como: un nuevo edificio, existencia de arbustos, polvo, desechos de aves y otros, que provocan, en el mejor de los casos, una disminución del suministro de energía eléctrica. Ver Figuras 2.9, 2.10 y 2.11.

Figura N° 2.9: Sombra parcial por presencia de chimenea en techo

Fuente: <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/autoconsumo-antichimeneas>



Figura N° 2.10: Lado izquierdo presencia aves y lado derecho hojas caídas en el panel solar



Fuente: <https://www.cursofotovoltaica.com/energia-solar-online/introduccion-energia-solar/>

Figura N° 2.11: Ubicación deficiente de paneles fotovoltaicos

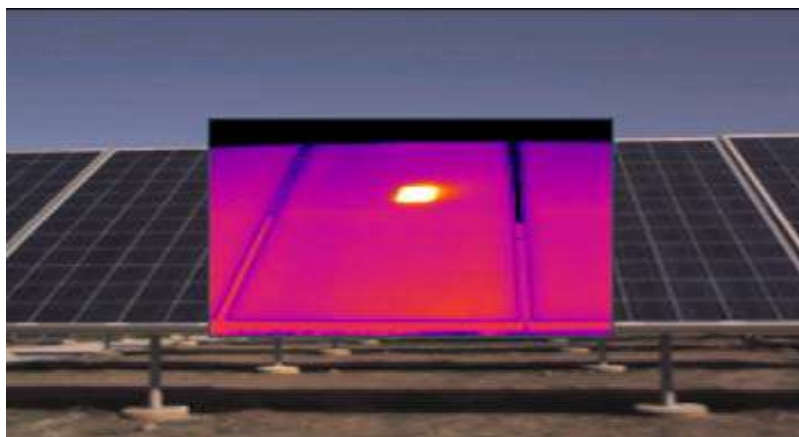


Fuente: <https://ecofener.com/blog/cuales-son-los-efectos-de-la-sombra-en-un-panel-solar-fotovoltaico/>

Sin embargo, cuando una celda está averiada o no genera energía suficiente por el efecto de alguna sombra, se puede producir la llamada polarización de forma inversa, pasando a comportarse como una carga en vez de un generador, lo cual puede implicar una alta disipación de calor.

Esta situación es fácilmente detectable si se utiliza el equipo adecuado, como una cámara termográfica. Ver Figura 2.12.

Figura N° 2.12: Panel fotovoltaico que presenta una celda defectuosa



Fuente: Roberto Poyato, Utilización de la termográfica en el mantenimiento de plantas Fotovoltaicas, Dpto. soporte técnico de Fluke ibérica.

En cualquiera de los casos, este tipo de problema supone una disminución del rendimiento del panel, lo cual se traducirá en un mayor tiempo para lograr el retorno de la inversión. Adicionalmente, los problemas asociados a una sobre temperatura pueden dar lugar a que las celdas adyacentes disminuyan su eficiencia o que incluso lleguen a averiarse, expandiendo el problema a todo el panel.

2.2. Planteamiento del problema

Una de las actividades poco tomados en cuenta lo constituyen la falta de continuidad en el mantenimiento¹¹ de estos equipos, esto debido a la acumulación de polvo y la existencia de sombras parciales sobre los paneles solares.

Es importante conocer que cualquier tipo de sombra sobre un panel solar disminuye su capacidad de producción; así, 10% de área sombreada sobre un panel fotovoltaico puede disminuir hasta 90% en la producción de energía eléctrica. Además, una pequeña sombra puede provocar puntos calientes en el panel pudiendo disminuir la vida útil. Por eso se debe poner especial atención al proyectar las instalaciones solares y definir correctamente la ubicación de los captadores, sobre todo si son paneles fotovoltaicos.

Un 10% de sombra sobre un panel fotovoltaico puede provocar una disminución de hasta 90% de su capacidad de generación.¹²

¹¹ Ver en anexos, propuesta de plan de mantenimiento preventivo a paneles solares.

¹² Los captadores solares y la sombra Por: Luis Bérriz Pérez. Doctor en Ciencias Técnicas. Presidente de CUBASOLAR.



El efecto negativo, producto de sombras parciales, está en dependencia de las particularidades del entorno y de la correcta limpieza que se debe realizar a estos equipos fotovoltaicos.

Algunas características de estas instalaciones se observan en las Figuras 2.13 y 2.14.

Figura N° 2.13: Presencia de sombras por desechos depositados



Fuente: Google Imágenes de paneles solares por desechos de pájaros

Figura N° 2.14: Sombras total y parcial producto de una mala instalación



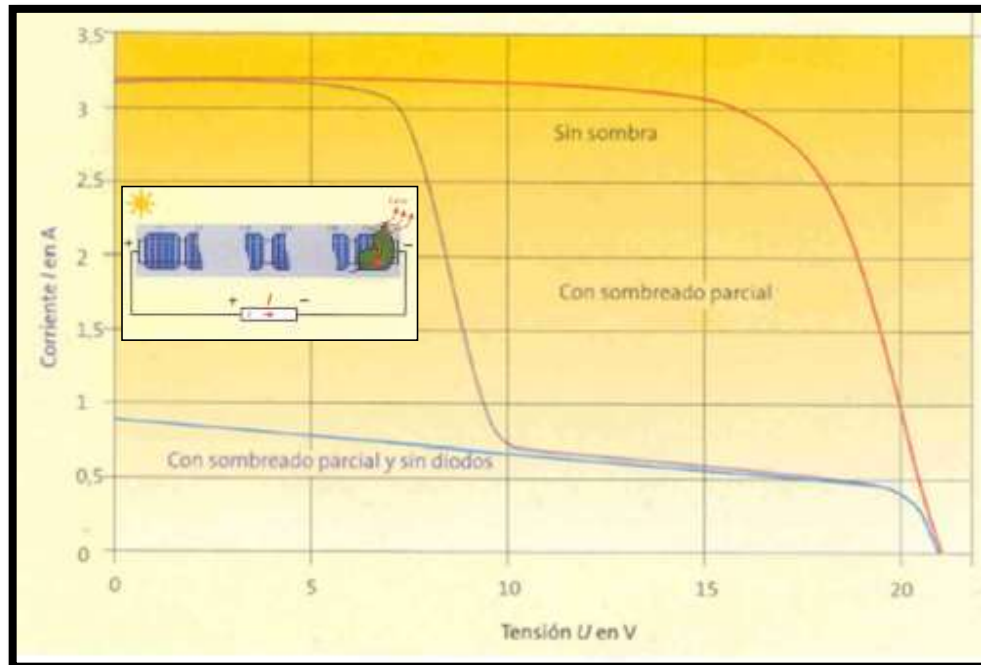
Fuente: <https://www.mpptsolar.com/es/paneles-solares-serie.html>

El funcionamiento de las células solares debe ser lo más libre posible; esto quiere decir, sin la interrupción de objetos u otros elementos, aunque en ocasiones o circunstancias no previstas pueden presentarse tales interrupciones.



La existencia de estos elementos en el panel, provocará una pérdida de energía, pero, si no se toman en cuenta dichos obstáculos, se ocasionará una posible destrucción del equipo; esto por el fenómeno de los puntos calientes. Ver Figura N° 2.15.

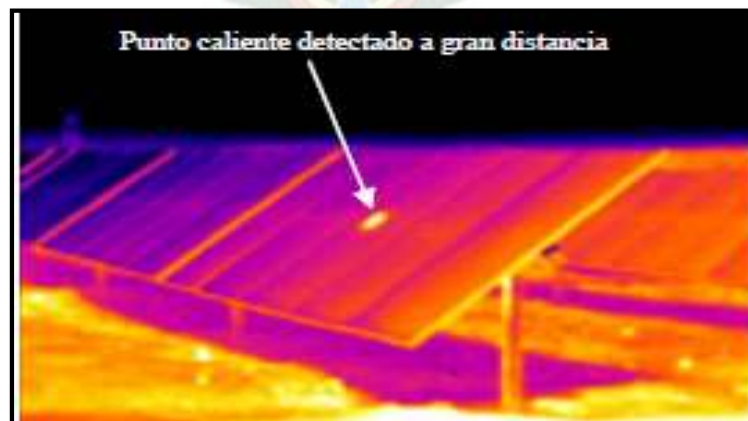
Figura N° 2.15: Efecto de las sombras en paneles solares



Fuente: Google Imágenes sombras parciales en paneles solares fotovoltaicos

La aparición de puntos calientes en una instalación fotovoltaica es un problema de gran importancia ya que afecta no sólo a la producción, sino también a la vida útil de dicha instalación (produciendo un envejecimiento prematuro), lo cual resulta preocupante si se tiene en cuenta que las instalaciones están, normalmente, pensadas para funcionar correctamente durante más de 20 años. Ver Figura N° 2.16.

Figura N° 2.16: Problemas de calentamiento en celda y caja de conexiones



Fuente: Roberto Poyato, Utilización de la termo gráfica en el mantenimiento de plantas Fotovoltaicas, Dpto. soporte técnico de Fluke ibérica.



2.2.1 Formulación del problema

¿De qué manera la existencia de sombras parciales en un panel fotovoltaico genera una disminución en la energía eléctrica?

2.3. Sistema de variables

Los sistemas considerados son los relacionados a las variables de entrada y salida. Cabe mencionar que estas variables se las debe medir, controlar y estudiar; para ello, se tiene lo siguiente:

Sistema de variables de entrada.

- La influencia de la radiación solar
- La influencia de sombras parciales.

Sistema de variable de salida.

- La potencia eléctrica.

2.3.1. Conceptualización y operacionalización de variables

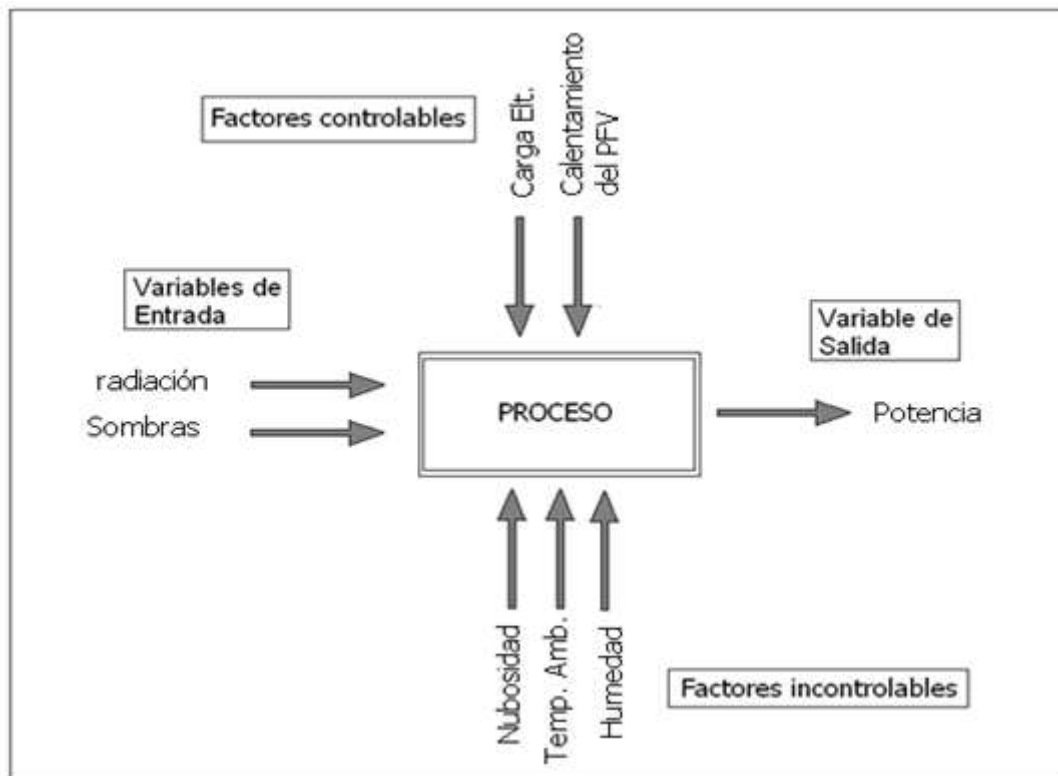
El diagrama de bloques del diseño experimental se muestra en la Figura N° 2.17, donde se identifican dos factores de entrada que son: la irradiación y las sombras en el panel solar, de las cuales interesa saber la influencia que producen en su interacción.

Los factores controlables son: la variación de la carga eléctrica y el calentamiento producido por las sombras en el panel solar.

Los factores incontrolables son: las nubosidades, la temperatura ambiente y la humedad relativa presentes en el día.

Y como factor de salida se tiene la potencia eléctrica producida por el panel fotovoltaico.

Figura N° 2.17: Diagrama de bloques del diseño experimental



Fuente: Elaboración Propia





CAPÍTULO III DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1. Planteamiento del experimento

El experimento se centra en determinar de forma cuantitativa la influencia que tienen las sombras parciales en el comportamiento energético de paneles solares, en la ciudad de La Paz, a 3452 msnm.

Se debe mencionar que las sombras son producto de un mantenimiento precario, mala instalación y circunstancias especiales no controladas.

El experimento se desarrolló en los predios del Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánica de la Universidad Mayor de San Andrés, en un área despejada libre de la irradiación indirecta. El lugar del experimento se muestra en la Figura N° 3.1 y tiene las siguientes características geográficas:

Ubicación del lugar de ensayo:

Predios del IIME

Latitud 16°32'19,69"S

Longitud 68° 3'45,98"O

Altura 3452 msnm

Figura N° 3.1: Lugar de experimentación en los predios del IIME

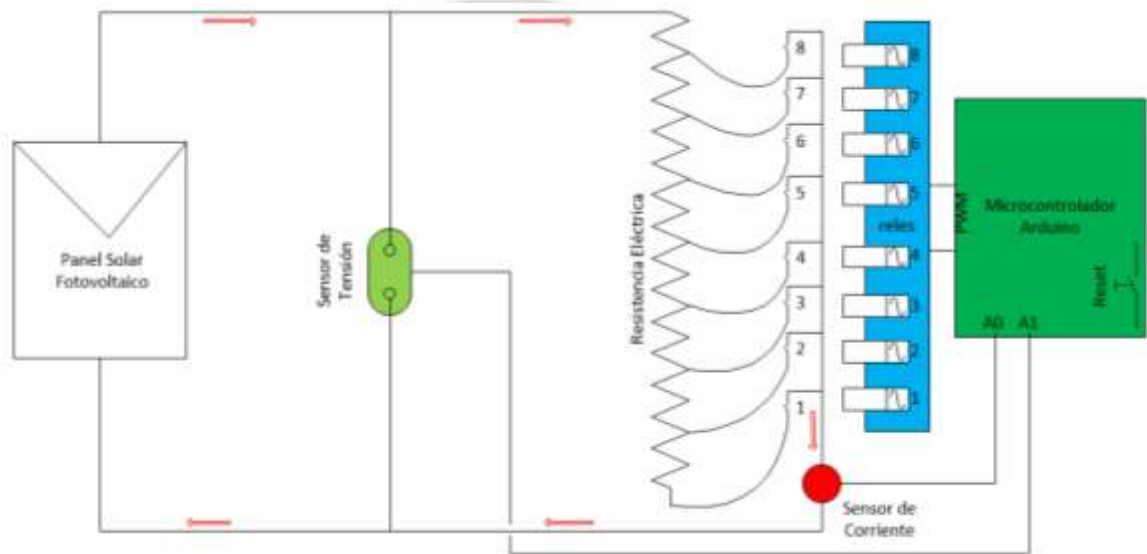


Fuente: <http://www.googleearth.com>

3.1.1. Implementación del equipo de recolección de datos

Para la investigación se montó el equipo de recolección de datos esquematizado en la Figura N° 3.2, donde se muestra al panel solar conectado a una resistencia eléctrica, la misma es controlada por un módulo de relés con el objetivo de variar la carga, que a la vez es comandada por un microcontrolador Arduino de acuerdo a una programación establecida. Los sensores de tensión y corriente son los componentes electrónicos que recogen toda la información de datos y son llevados a la memoria del microcontrolador para su análisis.

Figura N° 3.2: Esquema del equipo de recolección de datos



Fuente: Elaboración Propia

Pasos para la recolección de datos:

Paso 1. Se realiza la verificación del buen estado de las conexiones del equipo.

Paso 2. Se presiona RESET (para reiniciar) en el microcontrolador de Arduino para dar inicio al proceso de recolección de datos.

Paso 3. El panel fotovoltaico se conecta a la carga por medio de los relés y da inicio a la circulación de flujo de corriente.

Paso 4. Se activa el relé 1, provocando el máximo valor de resistencia (90 ohmios) y se registran los datos de tensión y corriente que posteriormente son almacenados en la memoria del microcontrolador. Este proceso se lleva a cabo hasta que el último relé (relé 8) se activa originando un mínimo valor en la resistencia eléctrica (10 ohmios).



Paso 5. Finalmente, los datos almacenados en la memoria del microcontrolador son llevados a un ordenador para su análisis e interpretación.

A continuación, se presenta el flujograma que resume todo el proceso de recolección de datos elaborados en la experimentación. Ver Figura N° 3.3.

Figura N° 3.3: Flujograma para la recolección de datos



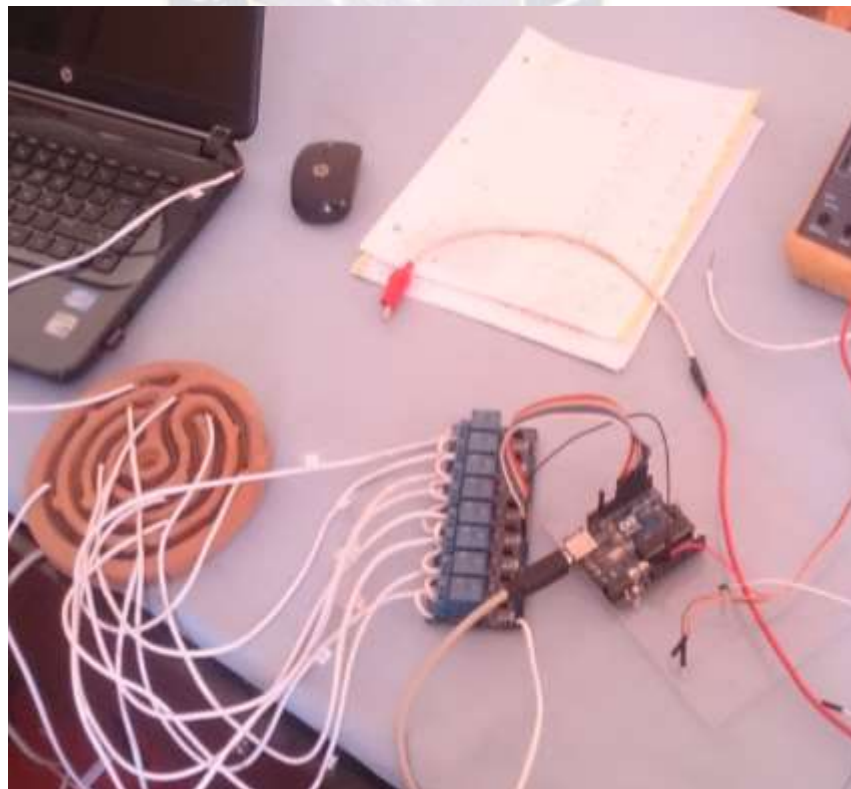
Fuente: Elaboración Propia

Seguidamente se muestra el equipo¹³ que se implementó para la recolección de datos. Ver Figura N° 3.4.

¹³ Para más información y visualización de fotos remitirse al Anexo A



Figura N° 3.4: Equipo de recolección de datos



Fuente: Elaboración Propia

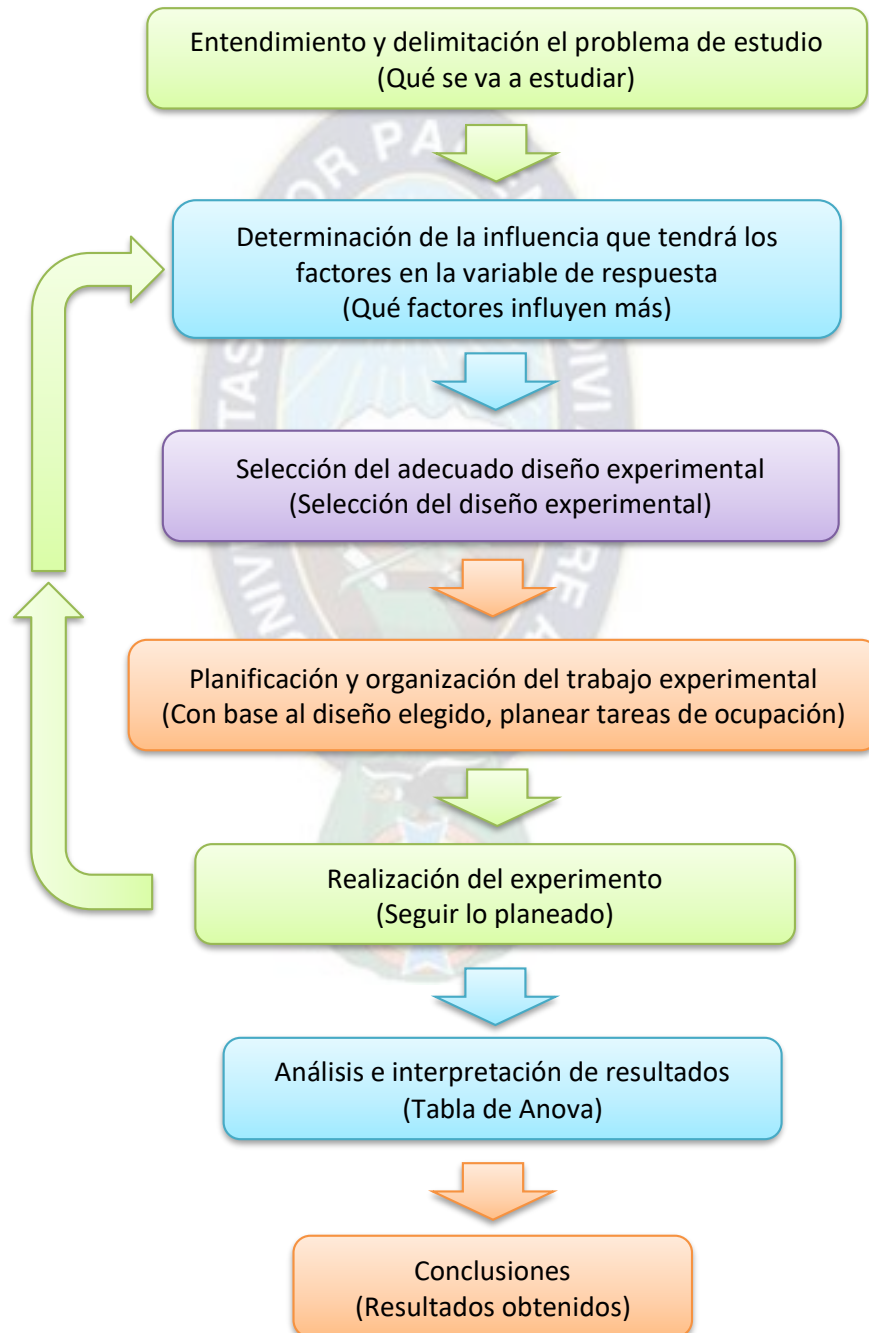


3.1.2. Método de experimentación

Etapas en el diseño del experimento

Para que la siguiente investigación proceda y proporcione excelentes resultados, se tuvo que seguir de manera riguroso las siguientes etapas indicadas en la Figura N° 3.5.

Figura N° 3.5: Flujograma de las etapas de diseño experimental



Fuente: Elaboración Propia



La Metodología

Las metodologías usadas son el estadístico y el experimental, basado en datos reales de campo, y con ayuda del programa computacional Design Expert v 7.0.1, se realizó el análisis de toda la información.

La información obtenida fue determinada de forma directa, mediante el equipo implementado para esta investigación.

Los instrumentos utilizados fueron: un voltímetro, amperímetro, un piranómetro, el equipo de recolección de datos y el panel solar.

3.1.3. Selección del diseño experimental

Para la selección del diseño experimental se utilizó la gráfica proporcionada en el libro Análisis y diseños experimentales de Gutiérrez Pulido Humberto y Román de la Vara Salazar, página 15. Ver Figura N° 3.6.

Figura N° 3.6: Clasificación de los diseños experimentales

1. Diseños para comparar dos o más tratamientos	<ul style="list-style-type: none"> — Diseño completamente al azar — Diseño de bloques completos al azar — Diseño de cuadros latino y grecolatino
2. Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre una o más variables de respuesta	<ul style="list-style-type: none"> — Diseños factoriales 2^k — Diseños factoriales 3^k — Diseños factoriales fraccionados 2^{k-p}
3. Diseños para la optimización de procesos	<ul style="list-style-type: none"> — Diseños para el modelo de primer orden <ul style="list-style-type: none"> — Diseños factoriales 2^k y 2^{k-p} — Diseño de Plakett-Burman — Diseño simplex
	<ul style="list-style-type: none"> — Diseños para el modelo de segundo orden <ul style="list-style-type: none"> — Diseño de composición central — Diseño de Box-Behnken — Diseños factoriales 3^k y 3^{k-p}
4. Diseños robustos	<ul style="list-style-type: none"> — Arreglos ortogonales (diseños factoriales) — Diseño con arreglos interno y externo
5. Diseños de mezclas	<ul style="list-style-type: none"> — Diseño simplex-reticular — Diseño simplex con centroide — Diseño con restricciones — Diseño axial

Fuente: Análisis y diseños experimentales de Gutiérrez Pulido Humberto y Román de la Vara Salazar, McGraw Hill/Interamericana de México, México, 2004.



Por lo tanto, la selección corresponde a un diseño factorial, esto debido a los factores que influyen a la variable de respuesta.

3.1.4. Nivel de medición

Son diferentes valores que se pueden fijar en un nivel dado a cada factor estudiado en un diseño experimental.

Los niveles propuestos para la investigación son para una inmediata realización del experimento, ya que los datos obtenidos pueden modificarse por el efecto de la temperatura en la superficie del panel, para ello, los niveles se muestran en la Tabla N°3.1.

Tabla N° 3.1: Clasificación de los niveles de medición

FACTORES			
Porcentaje de Sombra (%)		Radiación Solar (W/m ²)	
Niveles	25	Niveles	600
	50		700
	75		800
	100		1000

Fuente: Elaboración Propia

Número de ensayos N¹⁴

Para determinar el número de ensayos o corridas, se hace uso de la siguiente ecuación (3.1).

$$N = \text{Niveles}^{\text{Factores}} * \text{Réplicas} \quad (3.1)$$

Para el experimento, los factores de entrada son: el porcentaje de sombra y la radiación solar global (dos factores), cada una con cuatro niveles. El número de réplicas que se considera necesario son 2. Finalmente reemplazando los datos en la ecuación (3.1), se obtiene un total de 32 ensayos.

$$N = 4^2 * 2 = 32 \text{ ensayos}$$

¹⁴Montgomery Douglas, *Diseño y análisis de experimentos*, 2da Ed. 2004. Editorial Limusa Wiley S.A. México.



Aleatorización¹⁵

Consiste en hacer las corridas experimentales en orden aleatorio (al azar); y con materiales también seleccionados aleatoriamente. Este principio aumenta la probabilidad de que el supuesto de independencia de los errores se cumpla, lo cual es un requisito para la validez de las pruebas de estadística que se realizan. También, es una manera de asegurar que las pequeñas diferencias provocadas por materiales, equipo y todos los factores no controlados, se repartan de manera homogénea en todos los tratamientos.

3.1.5. Instrumentos de Investigación


Los instrumentos utilizados para la recolección de datos son:

- **Piranómetro**

Es un instrumento que determina el nivel de radiación que llega al panel solar fotovoltaico puesta en experimentación; las características del instrumento se resumen en la Tabla N° 3.2.

Tabla N° 3.2: Datos técnicos del Piranómetro

Sensor-de-radiación-total MP 200	
Marca	Apogee
Modelo	MP-200
Incertidumbre de calibración	± 5%
Máximo valor medible	1.750 W m ⁻²
Mínimo valor medible	0 W m ⁻²
Tiempo de respuesta	<1 ms
Entorno de funcionamiento	0 a 50 °C



Fuente: www.apogeeinstruments.com

- **Resistencia eléctrica**

Por medio de este elemento se logra variar la carga y la inmediata recolección del dato; las características del elemento se resumen en la Tabla N° 3.3.

¹⁵ Fuente obtenida de: Gutiérrez Pulido Humberto, *Análisis y Diseño de Experimentos*, McGraw Hill/Interamericana de México, México, 2004, Página 13

Tabla N° 3.3: Datos técnicos de la resistencia eléctrica


Resistencia tipo espiral		
Marca	RESIST	
Máximo valor medible	100 Ω	
Mínimo valor medible	1 Ω	
Calibre	20	
Máxima potencia	3000 W	

Fuente: google datos técnicos de resistencias eléctricas de espira

- **Multímetro digital**

Mediante este instrumento se calibran los sensores tanto de corriente como de tensión, las cuales pertenecen al equipo de recolección de datos. Las características del instrumento se resumen en la Tabla N° 3.4.

Tabla N° 3.4: Datos técnicos del voltímetro amperímetro

Voltímetro, amperímetro y óhmetro		
Marca	Testo 760-1	
Modelo	0590 7601	
Incertidumbre de calibración	0,8 %	
Máximo valor de tensión medible	600 V CC/CA	
Mínimo valor de tensión medible	0,1 mV CC/CA	
Máximo valor de corriente medible	10 A CC/CA	
Mínimo valor de corriente medible	1 mA CC/CA	
Máximo valor de resistencia medible	40 M Ω	
Mínimo valor de resistencia medible	0,1 Ω	
Tiempo de protección	IP 64	
Entorno de funcionamiento	-10 a 50 °C	


Fuente: www.testo.com

- **Sensor de corriente**

El sensor de corriente ACS712 es un accesorio para el microcontrolador Arduino; el mismo mide corriente cc/ca. Internamente trabaja con un sensor de efecto Hall que detecta el campo magnético que se produce por inducción de la corriente que circula

por la línea que se está midiendo, la misma es parte del equipo de recolección de datos; las características del instrumento se resumen en la Tabla N° 3.5.

Tabla N° 3.5: Datos técnicos del sensor de corriente


Sensor de corriente ACS712		
Marca	Sensor de corriente	
Modelo	ACS712	
Sensibilidad	185 mV/A	
Máximo valor de corriente medible	5 A CC/CA	
Mínimo valor de corriente medible	-5 A CC/CA	

Fuente: Google módulos para Arduino uno, sensor de corriente ACS712.

- **Sensor de voltaje**

El sensor de voltaje FZ0430 es un módulo que permite medir tensiones de hasta 25v DC de forma sencilla con una placa como el Arduino Uno. El medidor de voltaje FZ0430 es un simple divisor de tensión con resistencias de 30K y 7K5, lo que supone que la tensión percibida por el módulo sea dividida por un factor de 5 ($7.5/(30+7.5)$); las características del instrumento se resumen en la Tabla N° 3.6.

Tabla N° 3.6: Datos técnicos del sensor de voltaje FZ0430

Sensor de voltaje FZ0430		
Marca	Sensor de voltaje	
Modelo	FZ0430	
Resolución analógica de tensión	0,00489v DC.	
Máximo valor de voltaje medible	25 v DC	
Mínimo valor de corriente medible	0 v DC	

Fuente: Google módulos para Arduino uno, sensor de voltaje FZ0430



3.1.6. Técnicas de recolección de datos

Las técnicas de recolección de datos son mecanismos e instrumentos que se utilizan para reunir y medir información de forma organizada y con un objetivo específico. Usualmente se usan en investigación científica y empresarial, estadística y marketing¹⁶

Según Torres (s/f), señala que la recolección de datos primarios en una investigación científica se procede de forma básica por la observación, la encuesta o entrevista a los sujetos de estudio y por la experimentación.

Por lo tanto, la técnica para la recolección de datos corresponde a la experimental. Esta técnica permite de manera directa, precisa y confiable la recolección de datos para una investigación; Lo que conlleva a la elaboración de un experimento que sea factible, económico y posible de llevar a cabo por el experimentador.

Para la recolección de datos por medio del equipo implementado, se verifican dos requisitos importantes que son: la confiabilidad (la precisión que el instrumento tiene al no variar los valores medidos) y la validez (verificar que el instrumento mide lo que tiene que medir).

Finalmente, se empleó una computadora¹⁷ para la elaboración de tablas y las gráficas correspondientes para su interpretación.

3.1.7. Técnicas de análisis

Para el análisis de los datos, se usó la estadística Inferencial (Tabla de Anova), que determina si la hipótesis planteada es consistente o no; esto de acuerdo a los datos obtenidos (Wiersma¹⁸, 1986).

3.2. Selección de factores para el modelo planteado

El diagrama de bloques del diseño experimental que se muestra en la Figura N° 3.7, corresponde al modelo planteado para la investigación, donde se identifican dos factores de entrada: la radiación y las sombras en el panel solar. Su interacción de estos factores generará información muy relevante sobre las pérdidas que presenta un panel fotovoltaico.

¹⁶ Fuente: <http://148.202.167.116:8080/xmlui/handle/123456789/2801>

¹⁷ Ver en anexo A, el equipo para la recolección de datos.

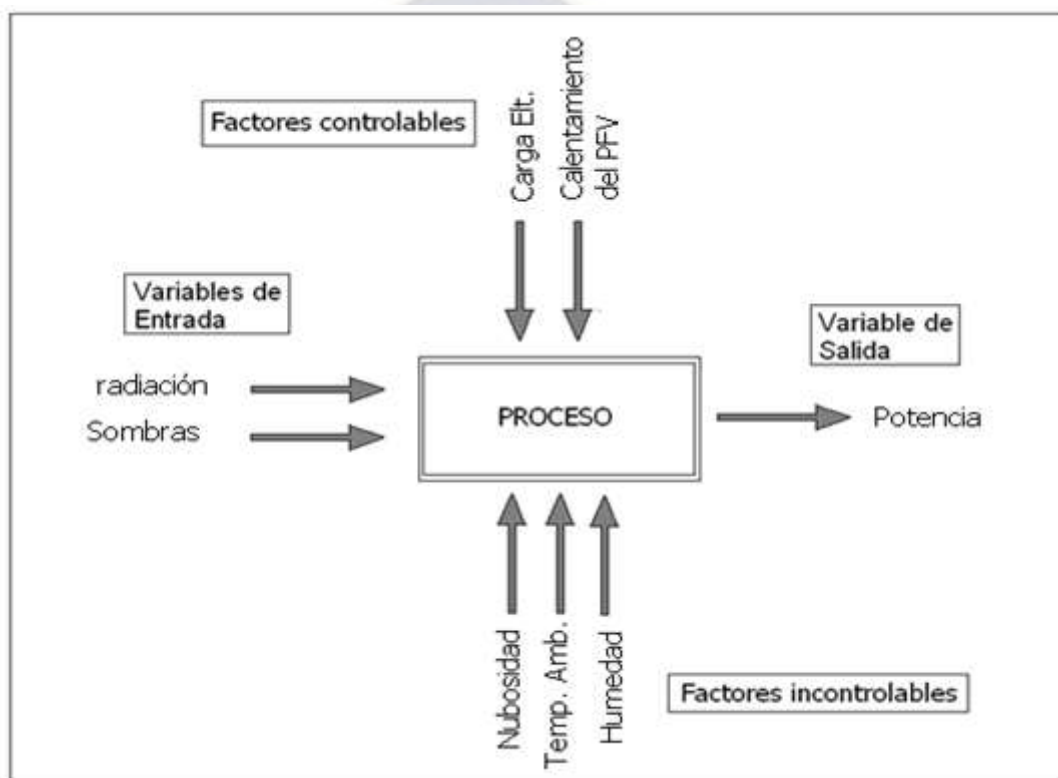
¹⁸ Metodología de la investigación por: Roberto Hernández Sampieri, pag.374

Los factores controlables son: la variación de la carga eléctrica y el calentamiento producido en el panel solar.

Los factores incontrolables son: las nubosidades, la temperatura ambiente y la humedad relativa presentes en el día.

Y como factor de salida se tiene la potencia eléctrica producida por el panel fotovoltaico.

Figura N° 3.7: Diagrama de bloques del diseño experimental



Fuente: Elaboración Propia

La influencia de las variables de entrada dará como resultado variaciones en la variable de salida.

3.2.1. Factores de entrada

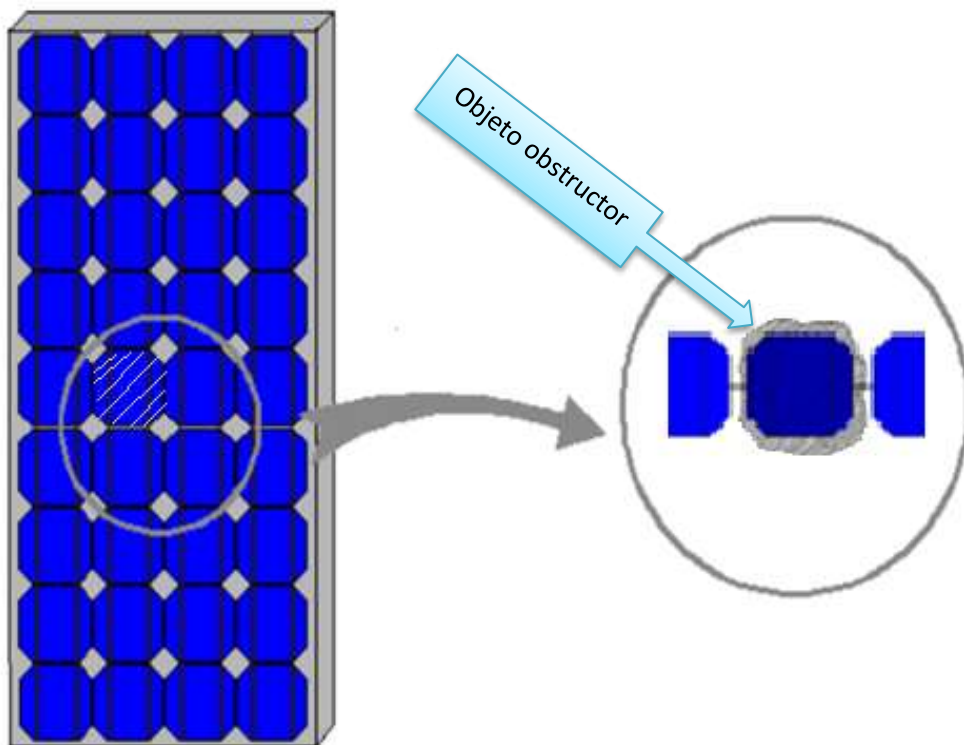
Para el experimento se consideran los siguientes factores de entrada: El porcentaje de sombra en el panel solar "S" y la radiación solar global en el panel "H", lo que permitirá un diseño factorial a ser tratado.

Porcentaje de sombra

Para el diseño experimental se considera la sombra como uno de los factores de mayor significancia, ya que la misma provocaría un alto grado de influencia en la variable de respuesta. Estudiar el comportamiento de este factor, proporcionará una importante información útil para la investigación.

Cabe mencionar que el nivel de porcentaje de sombra asignado, corresponde a una célula obstruida por un medio que evite el paso de la radiación solar (objeto obstructor). Ver Figura N° 3.8.

Figura N° 3.8: Panel solar con una sola célula obstruida al 100%.



Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto, el número de niveles de este factor será de cuatro, esto para el diseño experimental tal como se muestra en la Tabla N° 3.6.

Tabla N° 3.6: Niveles del factor de sombras parciales

SOMBRAS PARCIALES	
Nivel	Sombra [%]
Primer nivel (Una célula obstruida al)	25
Segundo nivel (Una célula obstruida al)	50
Tercer nivel (Una célula obstruida al)	75
Cuarto nivel (Una célula obstruida al)	100

Fuente: Elaboración Propia



Radiación solar global

La radiación solar es otro de los factores que se toma en cuenta para la siguiente experimentación. Cabe mencionar que este valor no es constante debido a la inclinación de la tierra y a su movimiento alrededor del sol.

Para ello se decide por cuatro niveles para el factor de la radiación solar global, que se resumen en la Tabla N° 3.7.

Tabla N° 3.7: Niveles del factor radiación solar global

RADIACIÓN SOLAR GLOBAL	
Nivel	Magnitud [W/m ²]
Primer nivel	600
Segundo nivel	700
Tercer nivel	800
Cuarto nivel	1000

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2. Factores de salida

Para la presente investigación se tiene un solo factor de salida, referido a la potencia eléctrica generada por el panel solar.

Viene expresada por la siguiente ecuación:

$$P_i = V_i I_i \quad (1.3)$$

Y como valores máximos,

$$P_{\max} = V_{mp} I_{mp} \quad (1.4)$$

Por lo tanto, para poder calcular la respuesta de salida (Potencia), se deben tomar dos datos de forma directa; la tensión de máximo pico y la corriente de máximo pico; esto en el circuito de ensayo de dicha investigación. Ver Figura N° 2.8.

3.3. Factores controlables e incontrolables

3.3.1. Factores controlables

Los factores controlables son aquellos que pueden variar a voluntad del investigador. Pero la presente investigación mantiene estos valores constantes. Estos factores son: la carga eléctrica y la temperatura del panel solar.



Carga eléctrica

En el experimento se utilizó una resistencia eléctrica con la posibilidad de variar su valor a la necesidad que se requiera; para mantener esta carga con un valor constante.

La temperatura del panel solar

Ésta se refiere al calentamiento del panel por efecto de la radiación solar. Es importante considerar este factor ya que su influencia provoca sesgos en los datos extraídos por efecto de la temperatura.

Para ello, se realiza la recolección de datos de manera inmediata manteniendo una temperatura ambiente en el panel solar.

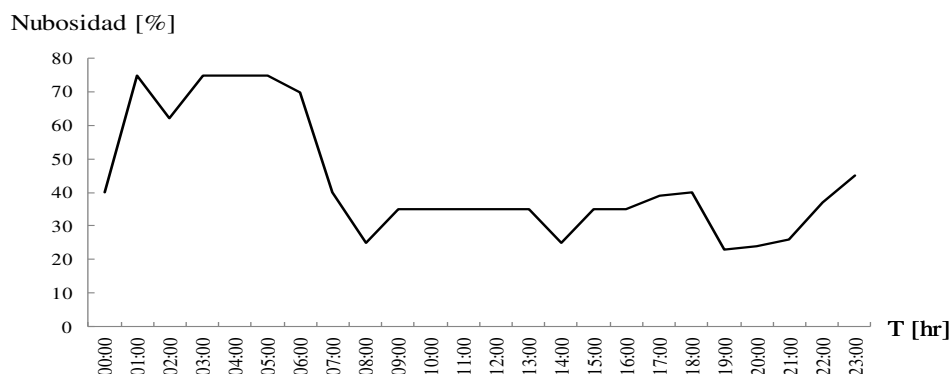
3.3.2. Factores incontrolables

Los factores incontrolables son aquellos que varían en el tiempo y no es posible controlarlos, debiendo ser considerados porque afectan a la respuesta. En el experimento, los factores a considerar son: la nubosidad, la temperatura y la humedad relativa del medio ambiente.

La nubosidad

La nubosidad es la cantidad de nubes presentes en un determinado área del espacio en el que se encuentra instalado el panel solar, a pesar de ser difícil de cuantificar debido a la densidad variable de las nubes. Este parámetro afecta significativamente a la radiación solar disminuyéndola, debido a que las nubes absorben y reflejan los rayos solares. La Figura N° 3.9, da una idea de la nubosidad durante el día y al mismo tiempo identifica las horas apropiadas para llevar a cabo el ensayo.

Figura N° 3.9: Comportamiento de la nubosidad en día específico



Fuente: <http://www.accuweather.com>



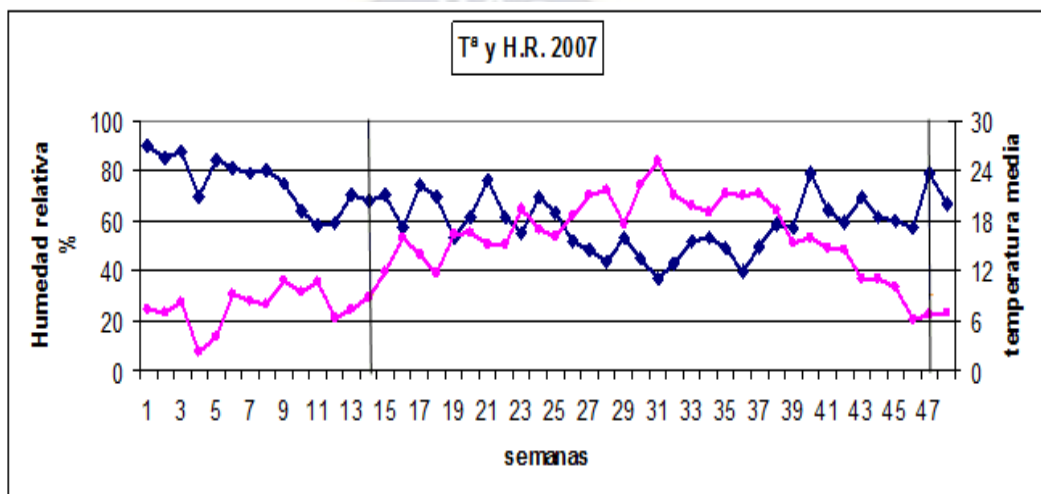
Temperatura ambiente T_a

La temperatura ambiente varía a lo largo del día, Figura 3.10, y este factor no puede controlarse en los ensayos ya que se realizan al aire libre. Por conveniencia se escogen las horas más favorables, como ser, al medio día.

Humedad relativa del medio ambiente H

La humedad relativa H, del medio ambiente varía inversamente con la temperatura ambiente. Ver Figura 3.10.

Figura N° 3.10: Comportamiento de la nubosidad en día específico



Fuente: [http:// www.google.com/](http://www.google.com/) graficas de la humedad relativa



3.4. Uso de software para el diseño experimental

Para el tratamiento de datos se utilizó el programa *Design Expert* v 7.0.1 con capacidad de aleatorización y análisis de influencia. El programa analiza factores numéricos con más de dos niveles. Ver Figura N° 3.11.

Figura N° 3.11: Paquete computacional Design Expert V 7.0.1



Fuente: Design Expert V 7.0.1



CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS EXPERIMENTALES

4.1. Medición y experimentación

La siguiente etapa de medición y experimentación corresponde a la recolección de datos que se realizó en campo y predios del Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánica de Cota Cota. Se tiene la Tabla N° 4.1, la misma se halla en el Anexo B de forma más detallada.

En base a la información que se presenta en la Tabla N° 4.1, se procede a interpretar los resultados obtenidos por el software.

Tabla N° 4.1: Medidas experimentales

Datos experimentales				
N°	Factores de entrada		Factor de salida	
	Radiación (w/m ²)	Porcentaje de Sombra (%)	Potencia $P_i = V_i I_i$	
1	600	25	22,95	22,80
		50	17,55	17,33
		75	12,47	12,60
		100	5,18	5,26
2	700	25	26,88	26,88
		50	19,90	20,00
		75	16,22	16,10
		100	5,63	5,46
3	800	25	27,40	27,12
		50	19,17	19,45
		75	16,67	16,24
		100	4,50	4,68
4	1000	25	33,28	33,76
		50	27,71	27,71
		75	19,33	19,69
		100	7,36	7,54

Fuente: Elaboración propia, datos de campo



Características consideradas en la realización del experimento

Para la experimentación y recolección de datos se consideraron las siguientes características:

- La toma de las muestras se realizó de manera rápida y confiable¹⁹.
- El factor de temperatura en el panel solar se controló de manera eficiente²⁰.
- La temperatura ambiente de trabajo osciló en un rango de 15°C a 20°C.
- El experimento se realizó en condiciones climáticas deseables (sin nubosidad, vientos muy débiles, y una humedad relativa aceptable).
- No se presentaron lluvias.
- Los ensayos se realizaron desde el 17 al 21 de Julio del 2017.
- Para la toma de datos se enfatizó principalmente en la limpieza del panel solar.
- No se presentó falla alguna en el panel solar en su experimentación.
- Mediante manuales se verificó el estado de los instrumentos y la precisión de los mismos para la recolección de datos.
- Se controló el nivel de irradiación proyectada en el panel solar, manteniendo en lo posible un valor constante.
- La recolección de datos se realizó mediante un protocolo establecido por el investigador.
- La toma de un dato osciló entre 20 a 30 segundos para un total de 36 tomas.
- Toda la información recogida fue cuidadosamente almacenada y registrada para su posterior interpretación.
- Terminada la etapa de recolección de datos, se procedió a verificar la precisión de los instrumentos.
- Finalmente se realizó la limpieza y almacenaje de los equipos que intervinieron en la experimentación.

4.2. Tratamiento de datos

En la Tabla N° 4.2, se presentan los datos experimentales y su correspondiente aleatorización; los mismos que serán interpretados paulatinamente.

¹⁹ Este resultado se evidencia en los datos obtenidos, las mismas no presenta sesgo alguno, ver Anexo B, medidas experimentales.

²⁰ Mediante el uso de un termómetro se controló la temperatura del panel a un intervalo de 18 a 20°C



Tabla N° 4.2: Medidas Experimentales y aleatorización de datos.

Std	Run	Block	Factor 1 A:Sombras P. (%)	Factor 2 B:Radiación (W / m2)	Response 1 Potencia (W)
23	1	Block 1	100	700	5.63
27	2	Block 1	50	600	17.33
1	3	Block 1	25	1000	33.28
13	4	Block 1	75	800	16.67
32	5	Block 1	100	600	5.18
10	6	Block 1	25	800	27.4
18	7	Block 1	25	700	26.88
14	8	Block 1	75	800	16.24
20	9	Block 1	50	700	20
5	10	Block 1	75	1000	19.69
24	11	Block 1	100	700	5.46
22	12	Block 1	75	700	16.1
6	13	Block 1	75	1000	19.33
31	14	Block 1	100	600	5.26
3	15	Block 1	50	1000	27.71
11	16	Block 1	50	800	19.17
16	17	Block 1	100	800	4.68
9	18	Block 1	25	800	27.12
12	19	Block 1	50	800	19.45
7	20	Block 1	100	1000	7.54
2	21	Block 1	25	1000	33.76
30	22	Block 1	75	600	12.47
29	23	Block 1	75	600	12.6
25	24	Block 1	25	600	22.95
15	25	Block 1	100	800	4.5
4	26	Block 1	50	1000	27.71
19	27	Block 1	50	700	19.9
21	28	Block 1	75	700	16.22
26	29	Block 1	25	600	22.8
28	30	Block 1	50	600	17.55
8	31	Block 1	100	1000	7.36
17	32	Block 1	25	700	26.88

Fuente: Design Expert V 7.0.1



Seguidamente se presenta el sumario de los datos ya seleccionados por el paquete computacional para su posterior evaluación. Ver Figura N° 4.1.

Figura N° 4.1: Sumario de datos para evaluación

File Version	11.1.0.1		
Study Type	Factorial	Subtype	Randomized
Design Type	Full Factorial	Runs	32
Design Model	2FI	Blocks	No Blocks
Center Points	0	Build Time (ms)	1,0000

Factor	Name	Units	Type	Minimum	Maximum	Levels
A	Sombras	%	Categoric	25	100	4
B	Irradiación	W/m2	Categoric	600	1000	4

Response	Name	Units	Observations	Analysis	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.	Ratio	Transform	Model
R1	Potencia	W	32	Factorial	4,5	33,76	17,65	8,71	7,50	None	2FI

Fuente: Design Expert V 7.0.1

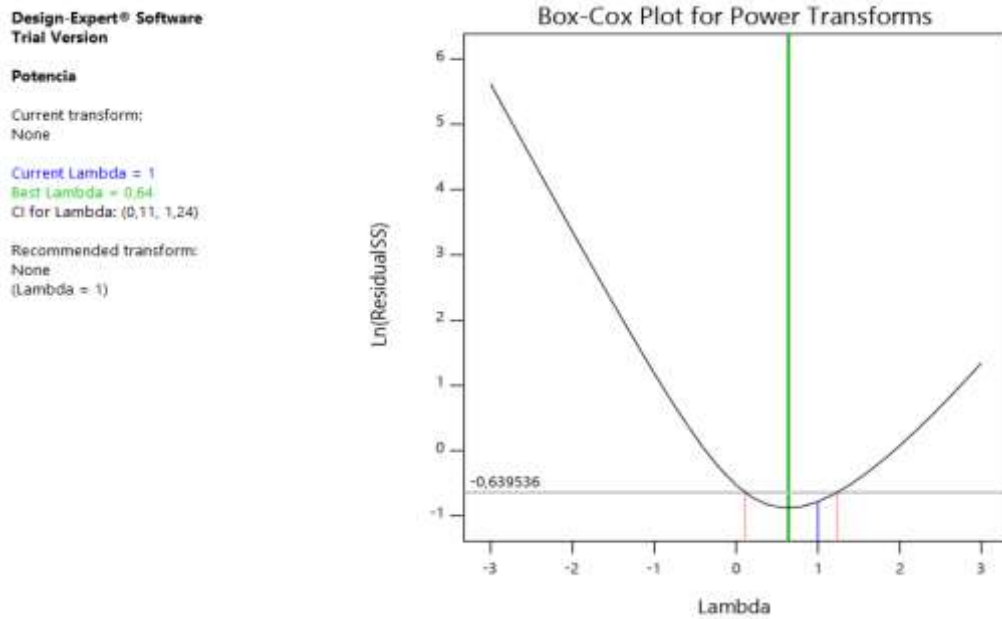
4.3. Validación

Para la validación del modelo se procedió al análisis de la significancia, tanto del modelo como de la influencia de las variables de interés, como ser: la radiación, porcentaje de sombras y su posible interacción.

4.3.1. Validación del modelo

Analizando la, Figura N° 4.2, se observa que el modelo no requiere ninguna transformación, ya que el valor de Lambda es igual a la unidad. Se puede observar que dicho valor se halla en un intervalo de 0.11 a 1.24 y que por recomendaciones del programa, no requiere transformación alguna.

Figura N° 4.2: Gráfica de transformación de una función de potencia



Fuente: Design Expert V 7.0.1

En la Figura N° 4.3, se observan los factores que se incluirán en el modelo a ser interpretado, esto debido al nivel de significancia, la misma que es menor a 0,05. Para ello se consideran: el factor A (sombras parciales), B (radiación) y AB (Interacción de factores).

Figura N° 4.3: Análisis de factores incluidos en el modelo

Term	df	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob > F
Intercept					
M A-Sombras P.	3	2052.58	684.19	23954.29	< 0.0001
M B-Radiación	3	239.79	79.93	2798.44	< 0.0001
M AB	9	57.44	6.38	223.44	< 0.0001
e Lack Of Fit	0	0.000			
e Pure Error	16	0.46	0.029		
Residuals	16	0.46	0.029		

Fuente: Design Expert V 7.0.1

La Tabla N° 4.3, que corresponde al análisis de varianza (Tabla de Anova) para variables de desempeño, señala qué factores poseen una significancia considerable.

En esta Tabla N° 4.3 se observa que el modelo tiene 15 grados de libertad y con un valor de $p < 0,0001$ es significativo, y de la misma manera la significancia de los



factores considerados posee el mismo valor, lo que da a conocer que el modelo planteado es el correcto.

Tabla N° 4.3: Análisis de varianza (Tabla de Anova)

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F Value</i>	<i>p-value Prob > F</i>	
Model	2349.81	15	156.65	5484.61	< 0,0001	significant
A-Sombras P.	2052.58	3	684.19	23954.29	< 0,0001	
B-Radiación	239.79	3	79.93	2798.44	< 0,0001	
AB	57.44	9	6.38	223.44	< 0,0001	
Pure Error	0.46	16	0,029			
Cor Total	2350.27	31				

Fuente: Design Expert V 7.0.1

En la Tabla N° 4.4, se tiene la desviación estándar del modelo con un valor de 0,17, y un estadístico de R cuadrado que explica la variabilidad de los datos con un 99,98% y un estadístico de R predicho con capacidad de predicción de datos del 99,92%. La precisión deseable debe ser mayor a 4, en este caso es de 242,084, lo que señala que es un buen indicador.

Tabla N° 4.4: Desviación estándar y estadístico del modelo

Std. Dev.	0.17	R-Squared	0.9998
Mean	17.65	Adj R-Squared	0.9996
C.V. %	0.96	Pred R-Squared	0.9992
PRESS	1.83	Adeq Precision	242.084

The "Pred R-Squared" of 0.9992 is in reasonable agreement with the "Adj R-Squared" of 0.9996.

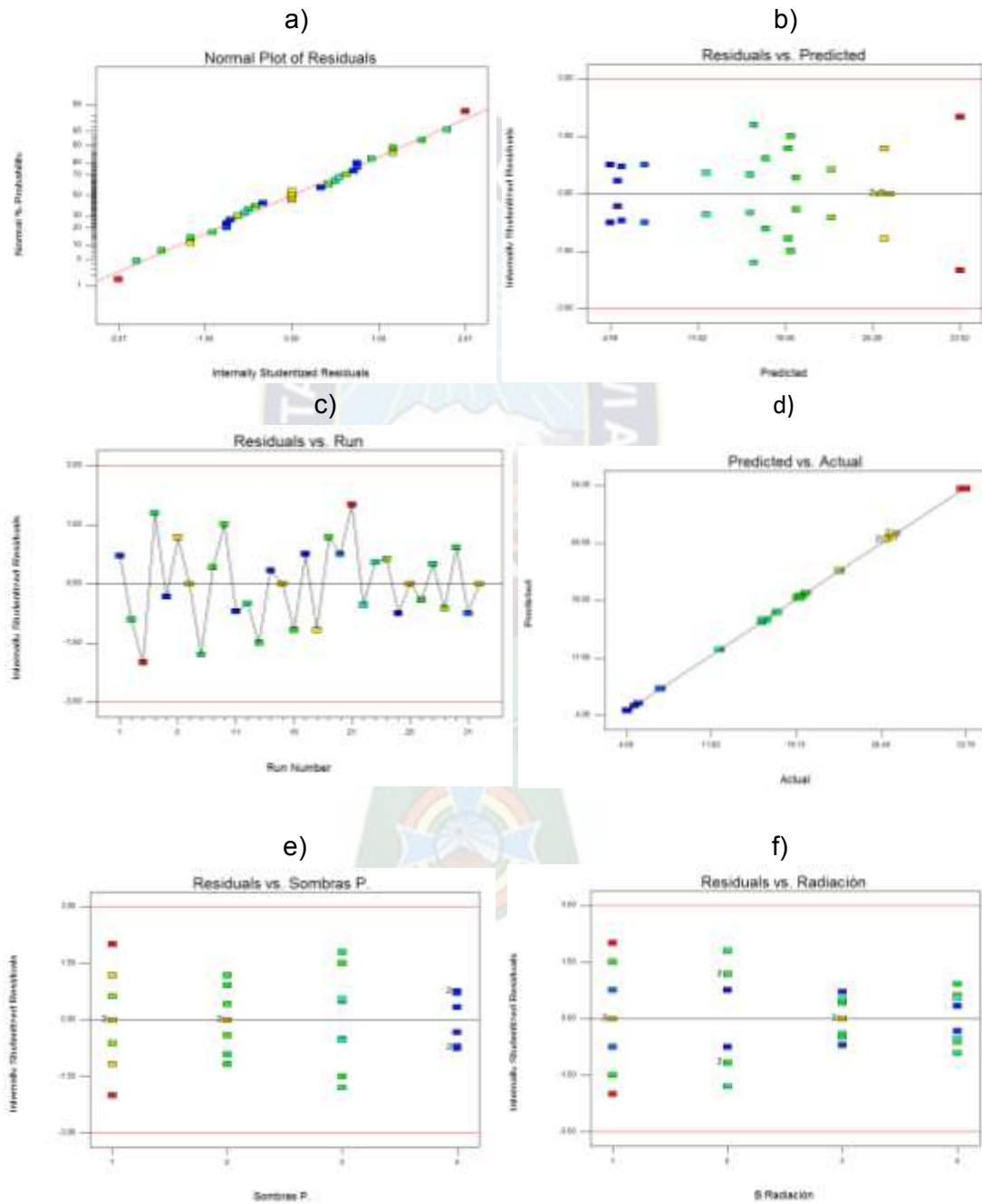
Fuente: Design Expert V 7.0.1



4.3.2. Validación de los supuestos estadísticos

Se verifican los supuestos estadísticos para que los resultados sean confiables, esto a través de los métodos gráficos, ver Figura N° 4.4.

Figura N° 4.4: Cumplimiento de los Supuestos Estadísticos: a) Normalidad, b) Residuales contra valores predcidos, c) Residuales contra número de corrida (Independencia), d) Predcidos contra respuesta actual, e) Residuales contra Sombras parciales, f) Residuales contra radiación solar.



Fuente: Design Expert V 7.0.1



De la Figura 4.4 a) se tiene la normalidad, que es una gráfica normal de residuos, en la misma se observa que los puntos forman una línea recta dando lugar al cumplimiento de los supuestos de la normalidad.

En la gráfica de los residuales contra los valores predecidos, Figura 4.4 b), se evidencia la no existencia de una tendencia de los residuales, lo que implica una buena precisión por parte del experimentador.

En la gráfica de los residuales en función de las corridas (Independencia), Figura 4.4 c), no se muestra ninguna tendencia, lo que indica que se realizó una buena aleatorización de los datos experimentales.

En la Figura 4.4 d), se observa que los puntos no se desvían de la línea, más bien se extiende sobre ésta. Esto muestra una aceptable capacidad de predicción de los datos por parte del modelo determinado.

Finalmente se muestran los residuales de los factores de sombras y la radiación, Figura 4.4 e) y f), que son aceptables pues no sobresalen de los límites inferior y superior mostrados en las gráficas correspondientes, al contrario, se hallan alejados de dichos límites.

Como se puede observar en las gráficas anteriores, todos los supuestos se cumplen, lo que da a conocer que las variables independientes tienen una significancia considerable en la variable de respuesta.

4.4. Influencia de los factores

En los siguientes subtítulos se analiza la influencia que ocasiona la respuesta de cada factor y el efecto que produce en la interacción entre ellos.

4.4.1. Análisis de la influencia de sombras

La influencia que tienen las sombras parciales en el comportamiento energético de un panel solar, posee las siguientes observaciones:

Para la gráfica a) de la Figura N° 4.5, se observa que la curva producida por la potencia eléctrica en función del porcentaje de sombras, posee una pendiente negativa, lo que indica que este factor a un nivel de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ de radiación es muy significativo.



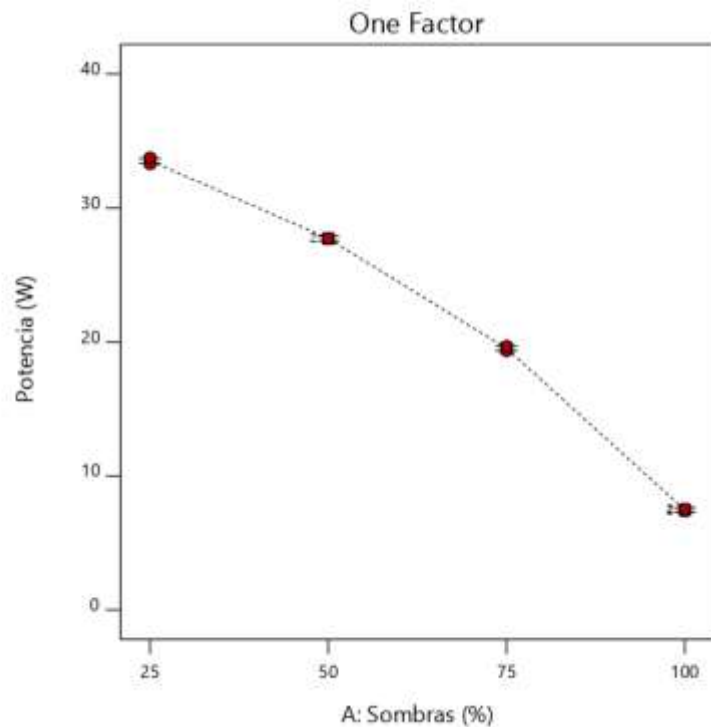
Proporcionando un decremento en la potencia generada de 33,52 [W] con un nivel de sombra del 25%, como límite superior y 7,45 [W] con un nivel de sombra del 100%, como límite inferior.

En las siguientes gráficas b), c), y d) de la Figura N° 4.5, se aprecian las mismas tendencias de las curvas, pendiente negativa, por lo que se puede afirmar que es un factor principal en la pérdida de potencia en el panel solar, y que su influencia es directamente proporcional a la variable de respuesta.

Figura N° 4.5: Potencia eléctrica vs sombras parciales

a) Nivel de radiación de 1000 [W/m²]

Design-Expert® Software
Trial Version
Factor Coding: Actual
Potencia (W)
● Design Points
X1 = A: Sombras
Actual Factor
B: Irradiación = 1000



Fuente: Design Expert V 7.0.1

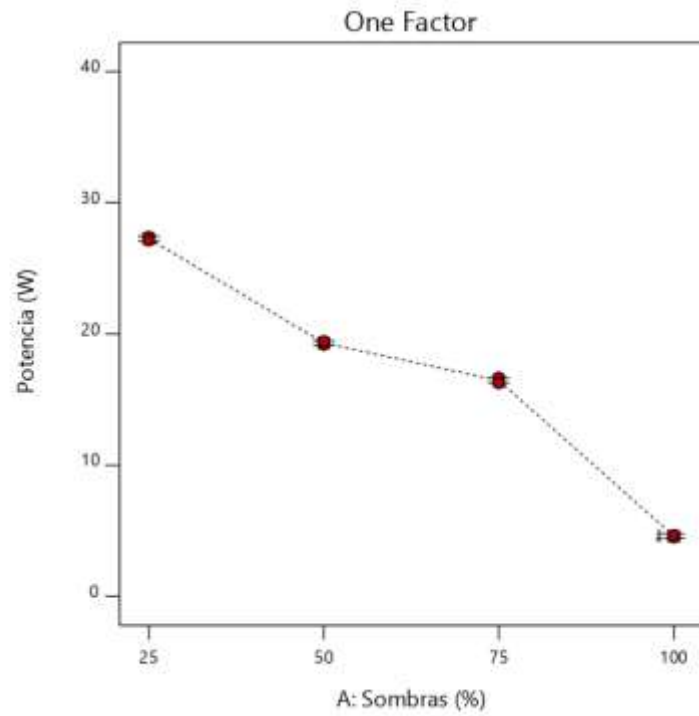
b) Nivel de radiación de $800 \left[\frac{W}{m^2} \right]$

Design-Expert® Software
Trial Version
Factor Coding: Actual

Potencia (W)
● Design Points

X1 = A: Sombras

Actual Factor
B: Irradiación = 800



Fuente: Design Expert V 7.0.1

Figura N° 4.5: Potencia eléctrica vs sombras parciales (continuación)

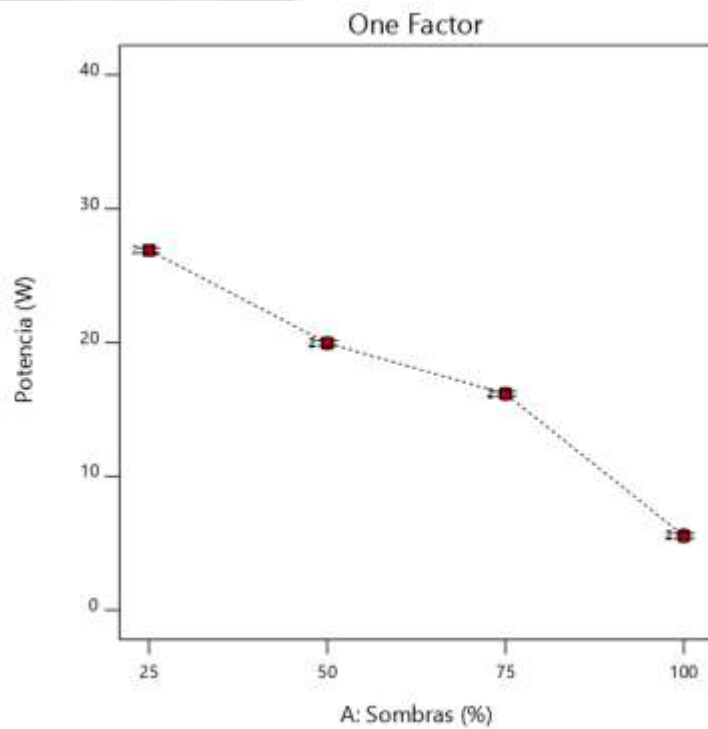
c) Nivel de radiación de $700 \left[\frac{W}{m^2} \right]$

Design-Expert® Software
Trial Version
Factor Coding: Actual

Potencia (W)
● Design Points

X1 = A: Sombras

Actual Factor
B: Irradiación = 700



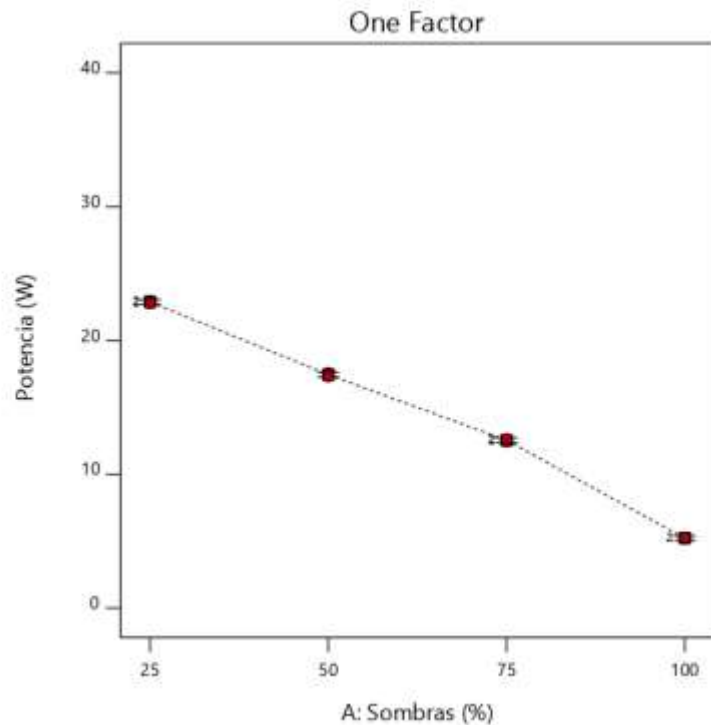
d) Nivel de radiación de $600 \left[\frac{W}{m^2} \right]$

Design-Expert® Software
Trial Version
Factor Coding: Actual

Potencia (W)
● Design Points

X1 = A: Sombras

Actual Factor
B: Irradiación = 600



Fuente: Design Expert V 7.0.1

4.4.2. Análisis de la influencia de la radiación solar

Para la investigación realizada sobre la influencia de sombras parciales en el comportamiento energético de un panel solar, se presentan las siguientes observaciones realizadas:

En la gráfica a) de la Figura N° 4.6, la curva producida por la potencia eléctrica en función de la radiación solar, posee una pendiente positiva poco pronunciada; esto en comparación al efecto de potencia vs sombras parciales mencionadas anteriormente, lo que indica que este factor, a un nivel de 25 [%] de sombras, posee una influencia en la variable de respuesta de forma significativa.

De igual manera esta curva presenta un decremento en la potencia generada de 33,52 [W] con un nivel de radiación de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, como límite superior y 22,88 [W] con un nivel de radiación de $600 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, como límite inferior.



En las gráficas b), c), y d) de la Figura N° 4.6, se aprecia que las pendientes de las curvas analizadas van reduciendo de valor, por lo que se puede afirmar que este factor también influye en la pérdida de potencia en el panel solar.

Por lo tanto, se confirma la hipótesis planteada anteriormente, que la presencia de sombras parciales provoca una disminución considerable en la generación de energía eléctrica en un panel solar.

Figura N° 4.6: Potencia eléctrica vs radiación solar

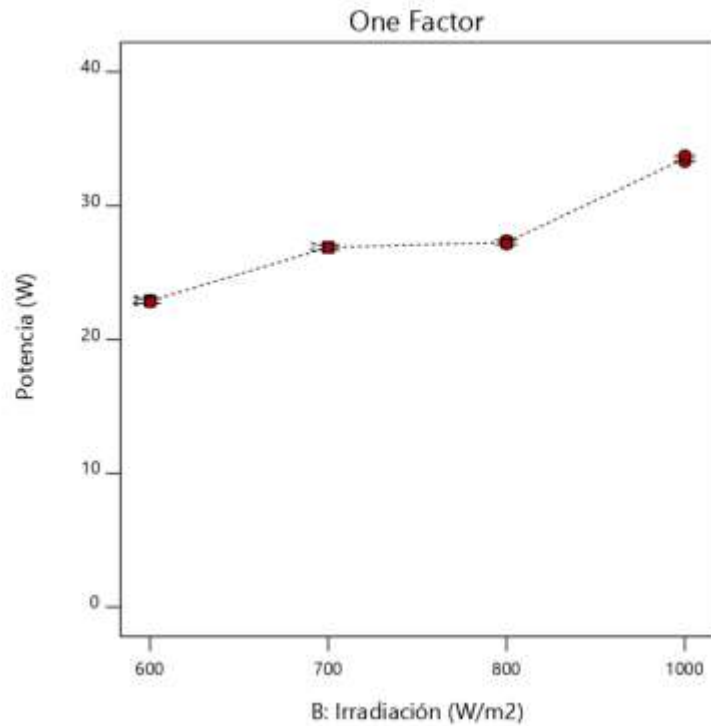
a) Nivel de sombra del 25 [%]

Design-Expert® Software
Trial Version
Factor Coding: Actual

Potencia (W)
● Design Points

X1 = B: Irradiación

Actual Factor
A: Sombras = 25



Fuente: Design Expert V 7.0.1





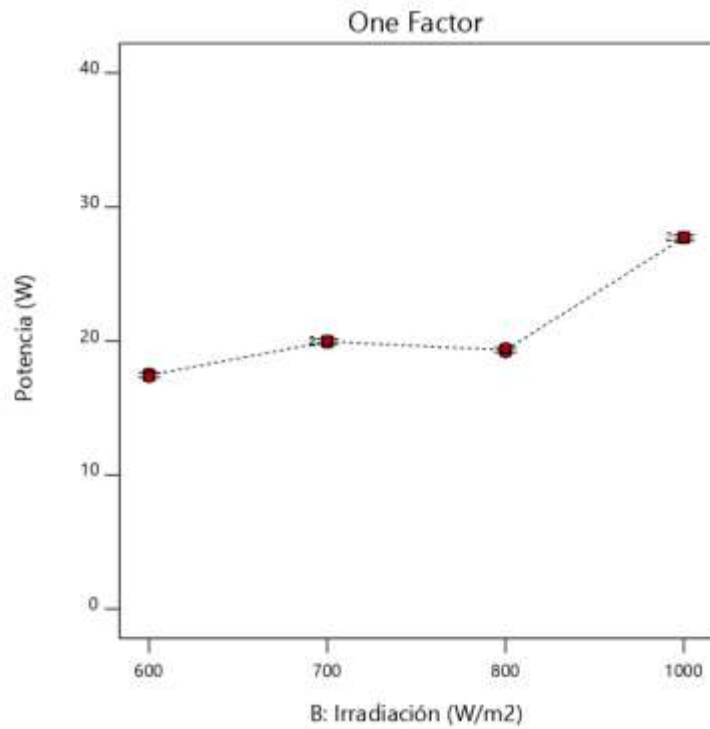
b) Nivel de sombra del 50 [%]

Design-Expert® Software
Trial Version
Factor Coding: Actual

Potencia (W)
● Design Points

X1 = B: Irradiación

Actual Factor
A: Sombras = 50



Fuente: Design Expert V 7.0.1

Figura N° 4.6: Potencia eléctrica vs radiación solar (continuación)

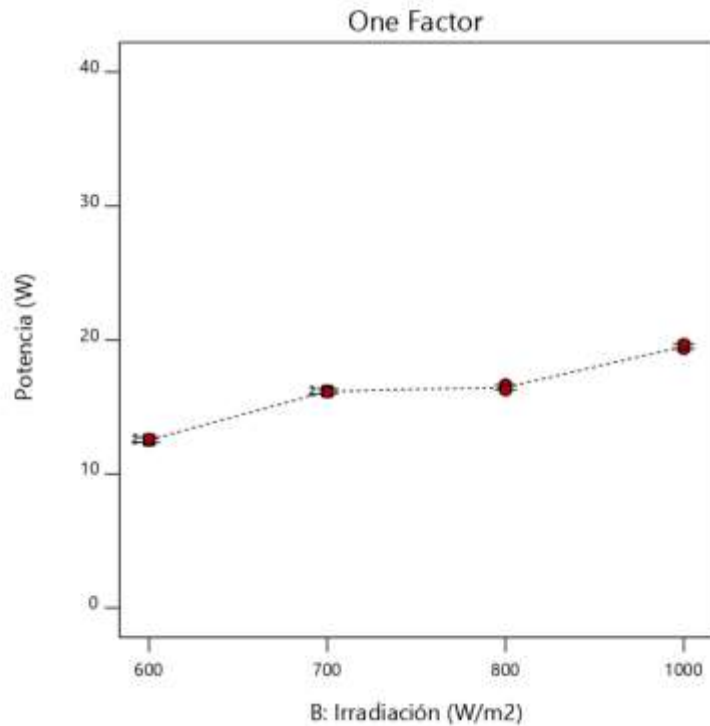
c) Nivel de sombra del 75 [%]

Design-Expert® Software
Trial Version
Factor Coding: Actual

Potencia (W)
● Design Points

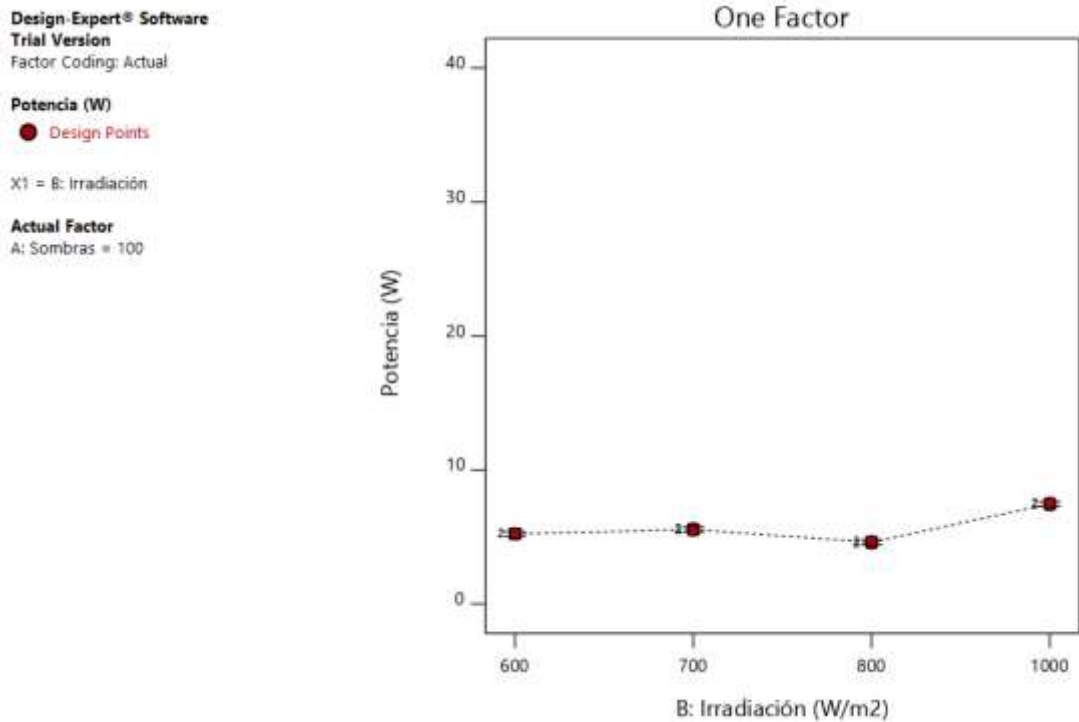
X1 = B: Irradiación

Actual Factor
A: Sombras = 75



Fuente: Design Expert V 7.0.1

d) Nivel de sombra del 100 [%]



Fuente: Design Expert V 7.0.1

4.4.3. Análisis sobre la combinación de los factores

Para la investigación realizada sobre la influencia de sombras parciales en el comportamiento energético de un panel solar en combinación con los factores, se obtiene los siguientes resultados:

Con referencia a la gráfica de la Figura N° 4.7, se puede observar que las curvas tienen una pendiente negativa, las mismas señalan que sí existen pérdidas considerables en potencia, producto de las sombras parciales y la radiación solar.

Al considerar los niveles de radiaciones de 700 y 800 $[W/m^2]$, las curvas tienden a ser una misma, con una ligera desviación entre ellas, lo que indica que dichos niveles, para la experimentación, no fueron elegidas correctamente, ya que no proporcionan ninguna información con referencia a la pérdida de potencia.

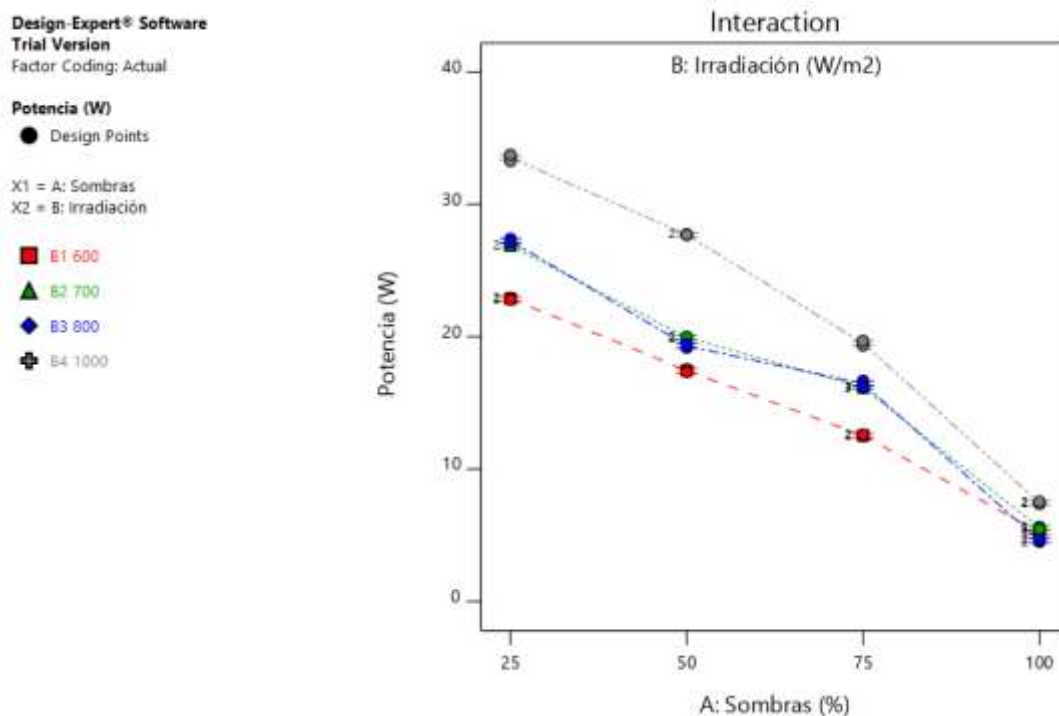
Por lo tanto, se puede señalar que la pendiente originada por esta combinación posee una mayor influencia independiente al de un análisis con un solo factor, como ser las



sombras y la radiación solar; Por lo que se puede afirmar, que la combinación de estos dos factores si influye potencialmente a la variable de respuesta.

De la misma manera, se observa en la Figura N° 4.7 que, a medida que el porcentaje de sombra va en aumento (más del 75%) los niveles de radiación van cobrando poca influencia y la potencia se reduce a un valor mínimo de 5,79 W, en promedio, cuando el porcentaje de sombra llega al 100%, la radiación va tendiendo a no ser significativa lo que conduce a señalar que las pérdidas de potencia son función del grado de sombra que se puede presentar en el panel solar.

Figura N° 4.7: Factores combinados (interacción) en la respuesta



Fuente: Design Expert V 7.0.1

4.4.4 Análisis por superficie de respuesta

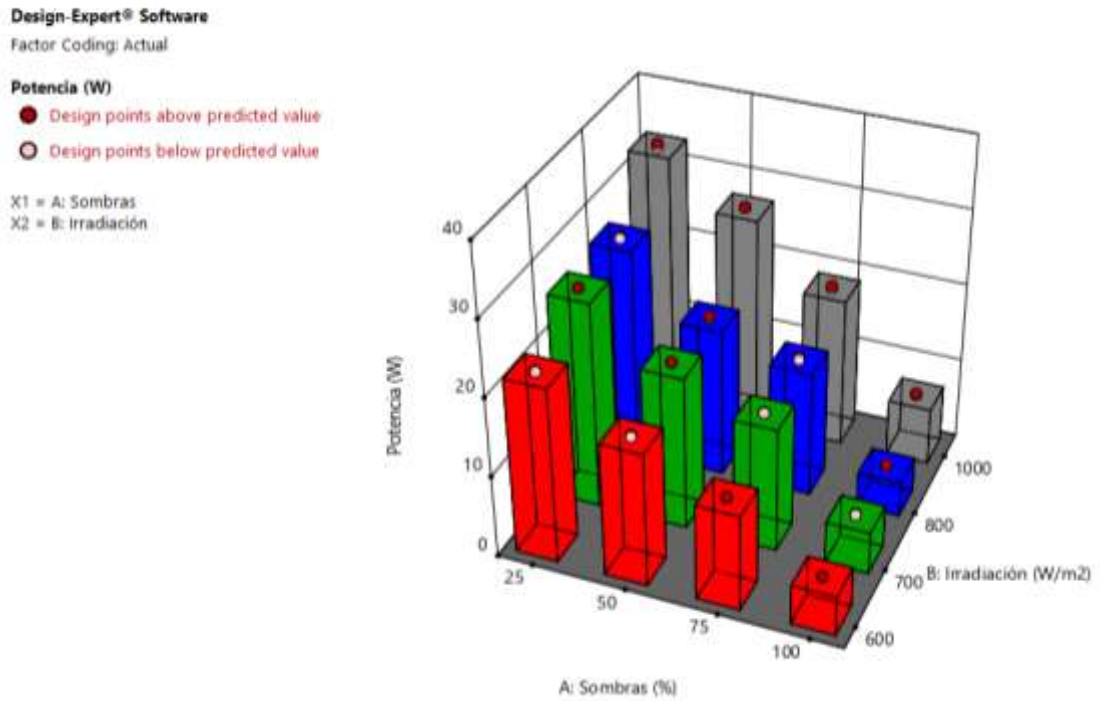
En la Figura N° 4.8, proporcionada por el paquete computacional Design Expert, se puede apreciar con más detalle, cómo las sombras parciales y la radiación solar influyen directamente en la potencia eléctrica del panel solar.

En la gráfica se puede apreciar cómo la presencia de sombras tiene mayor influencia en la potencia, esto en comparación a la radiación solar. Y que la combinación de estos factores origina una mayor pérdida en potencia.



Por lo tanto, se puede asegurar que a mayor cantidad de sombras en un panel solar las pérdidas pueden ascender a más del 80%.

Figura N° 4.8: Superficie de respuesta



Fuente: Design Expert V 1.1.0.1



CAPÍTULO V

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. Resultados sobre la influencia de sombras parciales en paneles solares fotovoltaicos

Terminada la evaluación y el tratamiento de los datos experimentales, se obtuvieron los siguientes resultados:

Con referencia a la Tabla N°5.1, se observa cómo la potencia eléctrica en el panel solar fotovoltaico va disminuyendo, con el aumento de las sombras parciales y la radiación solar.

Tabla N° 5.1: Potencias solares en función de la radiación solar y sombras parciales

N°	Sombras (%)	Potencia (W)			
		H=1000 W/m ²	H=800 W/m ²	H=700 W/m ²	H=600 W/m ²
1	0	38,43	30,80	29,20	24,65
2	10	35,98	30,65	29,00	24,57
3	25	33,52	27,26	26,88	22,88
4	50	27,71	19,31	19,95	17,44
5	75	19,51	16,45	16,16	12,54
6	100	7,45	4,95	5,54	5,22

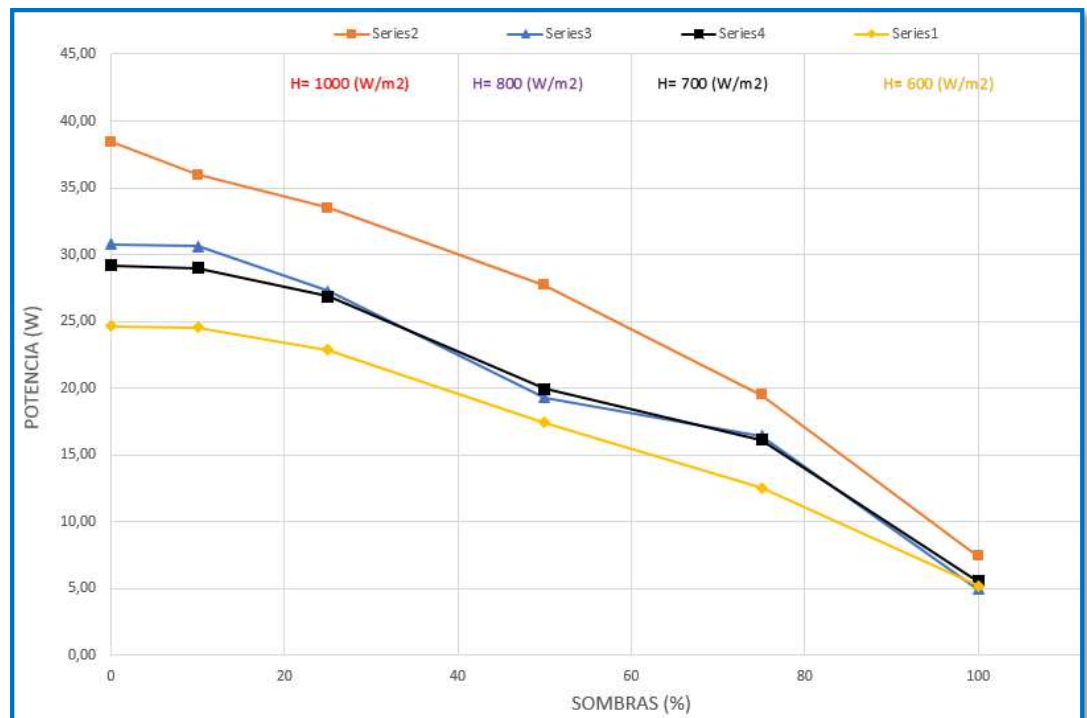
Fuente: Elaboración Propia, datos de campo

De la Tabla N° 5.1 se aprecia que la máxima potencia generada por el equipo fotovoltaico es de 38,43 Watt, ésta en ausencia de sombras y una radiación de 1000 W/m², y que el valor mínimo corresponde a 4,95 Watt, al 100% de sombras en la célula fotovoltaica y una radiación solar de 800 W/m².

Para una mayor comprensión en esta reducción de la potencia en función de las sombras parciales y la radiación, se tiene la gráfica de la Figura 5.1, la misma contrasta lo que se evidencia en la Tabla N° 5.1, que produce una disminución en la potencia generada por el panel solar.

Figura N° 5.1: Decremento de la potencia vs sombras parciales en el panel solar.

a) Gráfica obtenida por Excel 2010



Fuente: Design Expert V 7.0.1

En la gráfica de la Figura N° 5.1, se evidencia cómo disminuye la potencia eléctrica en cada curva correspondiente, producto de la variación de las variables independientes como ser: la radiación solar y el porcentaje de sombras parciales en el panel fotovoltaico.

Analizando la gráfica, se observa que existe mayor pérdida en la curva de color rojo comparada a la curva de color naranja; por lo que se puede mencionar que, a mayor radiación solar, las pérdidas por la existencia sombras parciales son muy significativas.

Observando la Figura N° 5.1, se puede mencionar que si una célula fotovoltaica está totalmente obstruida por alguna sombra, ésta produce una reducción de potencia muy significativa como ser más del 75%, sin importar el nivel de radiación solar que se esté proyectando en el panel solar.

Mediante la Tabla N°5,2, se observar que el panel solar puesto en experimentación tiene las siguientes pérdidas en potencia (en unidades de porcentaje), considerando como variables independientes el porcentaje de sombras parciales y la radiación solar.



Donde se observa que la mayor pérdida se halla en el intervalo de: 78,82% a 83,93%, con la consideración de un 100% de sombra en una célula fotovoltaica del panel solar. Lo que indica estos datos es que de ninguna manera se debe obstruir ni una sola célula por algún objeto.

Tabla N° 5.2: Pérdidas de potencia en función de la radiación solar y sombras parciales

N°	Sombras (%)	Pérdidas (%) H=1000 W/m ²	Pérdidas (%) H=800 W/m ²	Pérdidas (%) H=700 W/m ²	Pérdidas (%) H=600 W/m ²
1	0	0	0	0	0
2	10	6,38	0,49	0,68	0,32
3	25	12,78	11,49	7,95	7,18
4	50	27,89	37,31	31,68	29,25
5	75	49,23	46,59	44,67	49,13
6	100	80,61	83,93	81,03	78,82

Fuente: Elaboración Propia

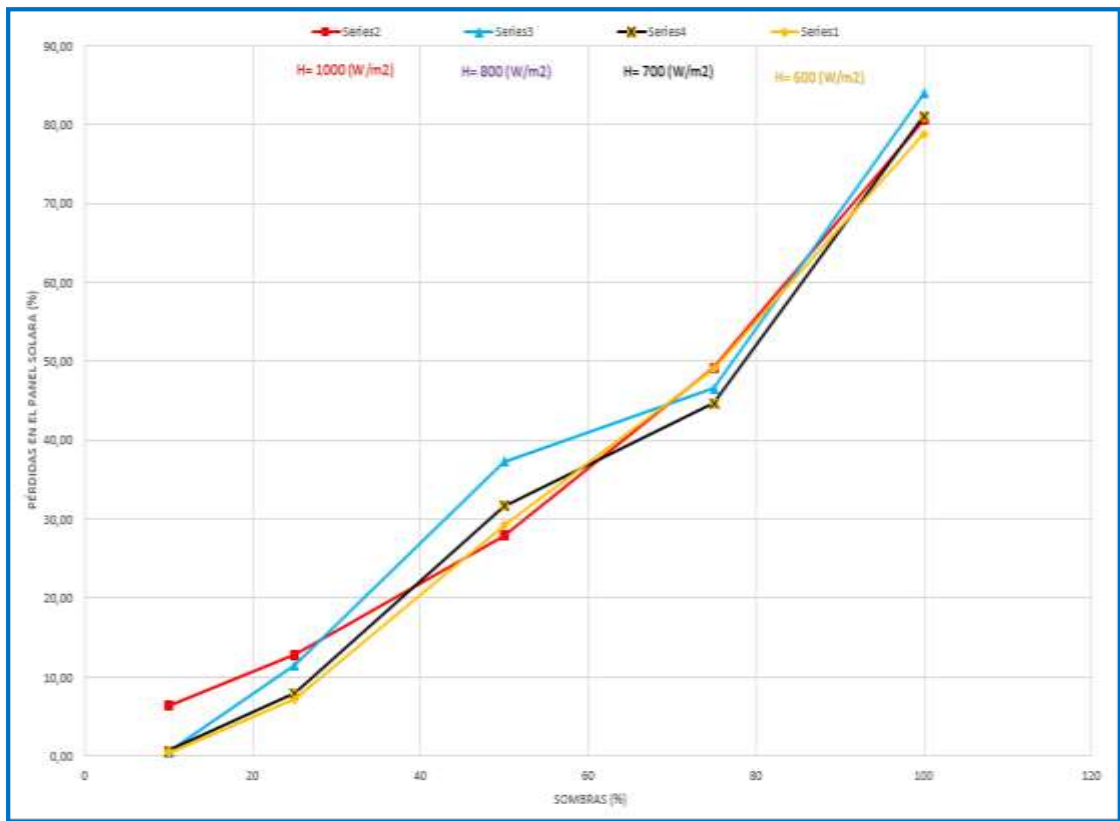
Para la obtención de la Tabla N° 5,2, se utilizó la siguiente ecuación²¹ de reducción de pérdidas de potencia:

$$\Delta P_{\%} = 100 * \frac{Pot. Generada en el panel (W) - Pot. Reducida por sombra en panel (W)}{Pot. Generada en el panel (W)} \quad (5,1)$$

Para una mayor comprensión de la Tabla 5.2, se realizó la gráfica de pérdidas de potencia en función de sombras parciales en el panel solar. Ver Figura N°5.2, la misma señala que las pérdidas producidas en el panel solar tienen una relación a la existencia de sombras parciales.

²¹ *Medidas y Errores, Alfredo Alvarez C y Eduardo Huayta C., 2da Edición, La Paz Bolivia, 2000.*

Figura N° 5.2: Pérdidas de potencia vs sombras parciales en el panel solar



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura N° 5,2, se observa que las pérdidas de potencia tienen una tendencia polinómica²² de orden 2, lo que indica que su incremento se hace más drástico que en el caso de una tendencia lineal.

Por otro lado, se puede mencionar que si un panel solar trabaja con una sola célula obstruida al 100%, se genera una pérdida en potencia máxima del 83,93%, esto a 800 $[W/m^2]$ de radiación solar.

Finalmente se comprueba el objetivo de la investigación, que señala, que la existencia de sombras parciales en un panel solar, influye directamente en el comportamiento energético, ésta con la disminución de la potencia eléctrica generada.

²² Para más detalle remitirse al anexo B



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

La investigación realizada obtuvo las siguientes conclusiones:

Con las pruebas experimentales realizadas al equipo puesto en estudio (panel solar fotovoltaico), se comprobó que la existencia de sombras parciales provoca una deformación significativa en la curva de funcionamiento del panel solar, la misma que genera una pérdida de energía eléctrica, ver gráficas Anexo B.

Se determinó que la obstrucción total de una célula fotovoltaica al 100% o lo que es lo mismo un sombreado parcial del 3 % del panel solar, sin importar el nivel de radiación solar, produce un promedio de 81,10 % de pérdidas en potencia.

La cuantificación del valor de sombra crítica en el panel fotovoltaico de manera experimental, es del 50% de la célula solar, la misma genera una pérdida de potencia del 31,53% (en promedio). Ver Tablas 5.1 y 5.2.

La selección del método de experimentación que mejor se ajusta, es el diseño factorial, el mismo proporcionó resultados estadísticos significantes con un valor de $p - value = 0,0001 < 0,05$, en la tabla de Anova. Indicando de esta manera que dichos factores son muy influyentes en la variable de respuesta.

Con los resultados mostrados en la experimentación realizada, se evidencia que un inadecuado mantenimiento o la ausencia del mismo a un panel solar, origina pérdidas considerables, provocando de esta manera deficiencias en la generación de energía eléctrica para el consumidor. Para evitar tales pérdidas, se adjunta al documento información básica sobre el plan de mantenimiento que se debe realizar a los paneles solares, ver Anexo A, plan de mantenimiento.

Para finalizar, se evidencia de forma experimental que el factor de sombras en un panel solar activo, corresponde a la principal variable independiente que origina la pérdida de energía eléctrica en un panel fotovoltaico.



6.2. Recomendaciones

Se recomienda lo siguiente:

Se recomienda implementar un mantenimiento programado con la inspección y limpieza diaria a los paneles solares fotovoltaicos.

Ampliar la investigación considerando el efecto de la temperatura y la influencia que tiene los paneles solares por presencia del viento y polvo.

Realizar la investigación de puntos calientes que puedan generarse por la existencia de sombras parciales, lo cual induciría a deterioros y daños significativos al panel fotovoltaico.

Se recomienda transmitir estos resultados al personal técnico especializado en instalación de panel solar, los mismos proporcionarán un mayor entendimiento en el mantenimiento que se debe realizar a estos equipos.





BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar Aguirre, A. J. (2014). *Proyecto de Grados Ensayos en Módulos Fotovoltaicos Bajo Normas IEC y ASTM*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de el Salvador, San Salvador.
- Aguilar, A. J. (2015). *Monografía Interfaz Gráfica para el Monitoreo de Variables en el Modulo Solar ET-250*. México: Instituto Tecnológico de Salinas Cruz.
- Almagro, L. (2004). *Estadística practica con MMINITAB*. España.
- Baldemar, G., & Villegas, J. (2013). *Aplicación de diseño de experimentos para el análisis de secado de un producto*. Universidad de Monterrey México. , México.
- Cengel, Y. (2004). *Transferencia de calor*. México: McGraw Hill / Interamericana editores S.A.
- Gutiérrez Pulido, H. (2004). *Análisis y Diseño de Experimentos*. México: McGraw Hill/Interamericana de México.
- Martín, D. T., Ilzarbe, D. L., Viles, D. E., & Álvarez, D. M. (2008). *Aplicación del Diseño de Experimentos (DoE) para la mejora de procesos*. Universidad de Navarra, San Sebastián, España, España.
- Ministerio de Hidrocarburos y energía. (2014). Plan Eléctrico del Estado Plurinacional de Bolivia 2015- 2025. *Ministerio de Hidrocarburos y energía*, 30.
- Molina P, J. (2003). *Manual de Formato*. Bolivia: Chippo's Enterprises Press Chuquiago.
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. México: Limusa Wiley S.A.
- Nogueira et al. (2015). Performance of monocrystalline and polycrystalline solar panels in a water pumping system in Brazil. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, pp 1610-1616.
- Poyato, R. (s.f.). Utilización de la termografía en el mantenimiento de plantas fotovoltaicas. *FLUKE*.
- Sampieri Hernández , R. (1997). *Metodología de la investigación*. México: McGraw Hill/Inter.
- Toledo, Y. (2019). Oferta eléctrica en Bolivia llega a los 2.235 MW. *ENERGY PRESS*, 1. Obtenido de <https://www.energypress.com.bo/2019/02/11/oferta-electrica-en-bolivia-llega-a-los-2-235-mw/>
- Torres, M., Paz, K., y Salazar, F. G. (s.f.). Métodos de recolección de datos para una investigación. Recuperado de http://fgsalazar.net/LANDIVAR/ING-PRIMERO/boletin03/URL_03_BAS01.pdf



Vargas, T. (2014). TRAZADOR DE CURVAS I-V DE CÓDIGO ABIERTO PARA MONITOREO DE RENDIMIENTO DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN BOLIVIA. *Scielo*, 17.

Viñán Andino, A. b. (2012). *Tesis de Grado diseño estadístico experimental para el estudio de la respuesta del maíz (zea mays l.) a la aplicación edáfica complementaria de tres tipos de abono sintético a dos dosis en la comunidad de peñas*. Escuela Superior de Chimborazo, Ecuador.



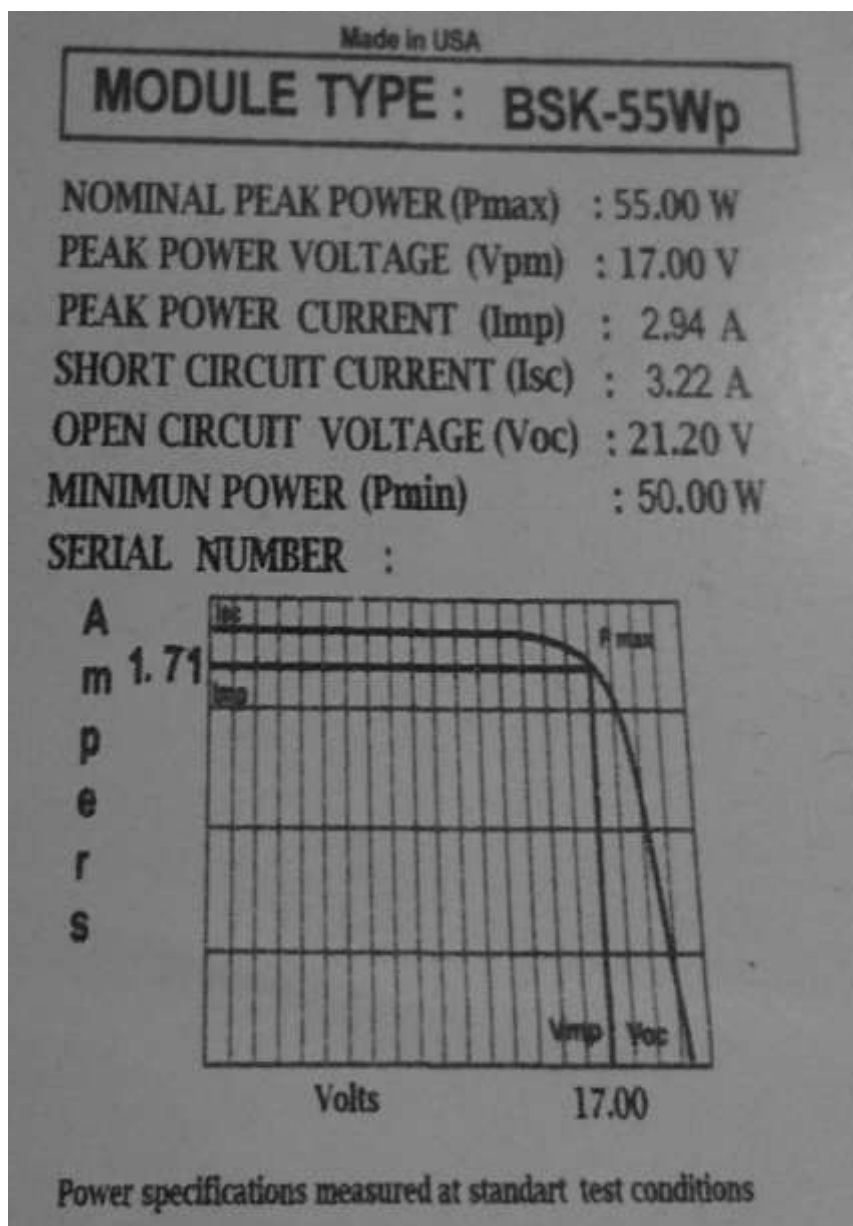
PÁGINAS WEB UTILIZADAS

1. DISEÑO EXPERIMENTALES, www.lamolina.com/20071007
2. Rendimiento de paneles solares SMA Solar Technology AG
3. Diseño de un seguidor solar para eficientar la captación de la energía solaren los paneles fotovoltaicos, www.itsarandas.edu.mx
4. Cómo utilizar Arduino y LabVIEW | Geeky Theory. , <https://geekytheory.com/arduino-y-labview/>
5. ¿Qué es Arduino? ~ Arduino.cl. (s/f), <http://arduino.cl/que-es-arduino/>
6. Mantenimiento de campos solares.
7. Pérdidas en instalaciones solares fotovoltaicas.
8. Computer simulation of shading effects inphotovoltaic arrays www.elsevier.com/locate/renene
9. Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/4196/cepedajuan2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

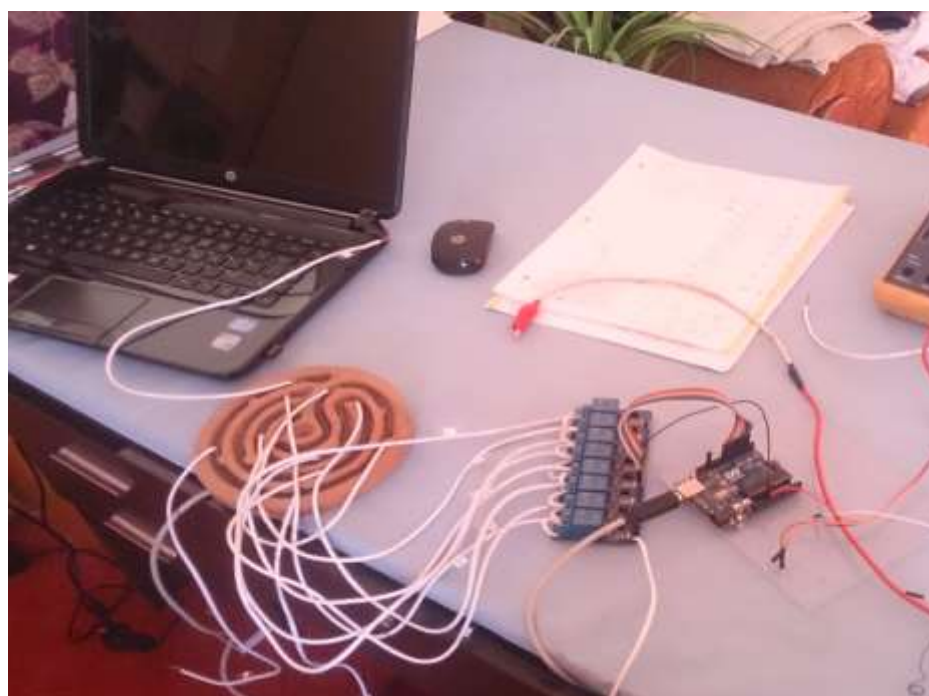
ANEXOS

ANEXO A **DATOS TÉCNICOS**

DATOS TÉCNICOS DEL PANEL SOLAR EN ESTUDIO



IMÁGENES DEL PANEL SOLAR Y EL EQUIPO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS



PLAN DE MANTENIMIENTO

Frecuencias y Tareas de Mantenimiento Preventivo y predictivo a Paneles Solares

Las tareas de mantenimiento preventivo y predictivo son estructuradas bajo las frecuencias ya planificadas de acuerdo al manual y criterio del planificador.

Mantenimiento Preventivo Diario

PANEL SOLAR

Actividad	Esp.	Estado/Lectura		Observación
		OK	NOK	
Inspección visual de la superficie del panel solar no existan objetos	Elm	○	○	

Mantenimiento Preventivo Semanal

PANEL SOLAR Y ESTRUCTURA

Actividad	Esp.	Estado/Lectura		Observación
		OK	NOK	
Limpiar la superficie del panel solar con agua por acumulación de polvo o desecho	Elm	○	○	
Limpiar la estructura del panel solar	Elm	○	○	

Mantenimiento Preventivo Mensual

ESTRUCTURA, BANCO DE BATERIAS Y CABLEADO

Actividad	Esp.	Estado/Lectura		Observación
		OK	NOK	
Verificar apriete de la tornillería de sujeción de la estructura (Marcas)	Elm	○	○	
Verificar la buena integridad de los cables.	Elm	○	○	
Verificar el nivel de electrolito en la baterías	Elm	○	○	
Verificar la sujeción de los cables a los bornes de la batería	Elm	○	○	
Comprobar el estado de los circuitos de protección	Elm	○	○	

Mantenimiento Preventivo Semestral

PANEL SOLAR, BANCO DE BATERIAS, REGULADOR Y LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA

Actividad	Esp.	Estado/Lectura		Observación
		OK	NOK	
Verificar la integridad del panel solar	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Verificar la buena integridad de las baterías	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Verificar la buena integridad del regulador de carga	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Verificar la buena integridad de la instalación eléctrica y su correspondiente sujeción	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

Mantenimiento Preventivo Anual

PANEL SOLAR, ESTRUCTURA, BANCO DE BATERIAS, REGULADOR DE CARGA Y LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA EN GENERAL

Actividad	Esp.	Estado/Lectura		Observación
		OK	NOK	
Verificar la integridad del panel solar	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Inspección visual del panel solar que no existan grietas o rajaduras.	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Verificar la buena integridad de las baterías	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Verificar la buena integridad del regulador de carga	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Verificar la buena integridad de la instalación eléctrica y su correspondiente sujeción	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Retirar la existencia de sulfatación en contactos.	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Inspección visual de fusibles y seccionador	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Comprobar la estanqueidad de las cajas de conexión y el estado de las juntas.	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Retirar sarro de la estructura y recubrir con pintura anti sarro	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Reapretar tornillos de fijación	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

Mantenimiento Predictivo Anual

PANEL SOLAR

Actividad	Esp.	Estado/Lectura		Observación
		OK	NOK	
Control de puntos calientes en el panel solar (cámara termografía)	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Comprobar la temperatura de operación de los componentes eléctricos (Termografía)	Elm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

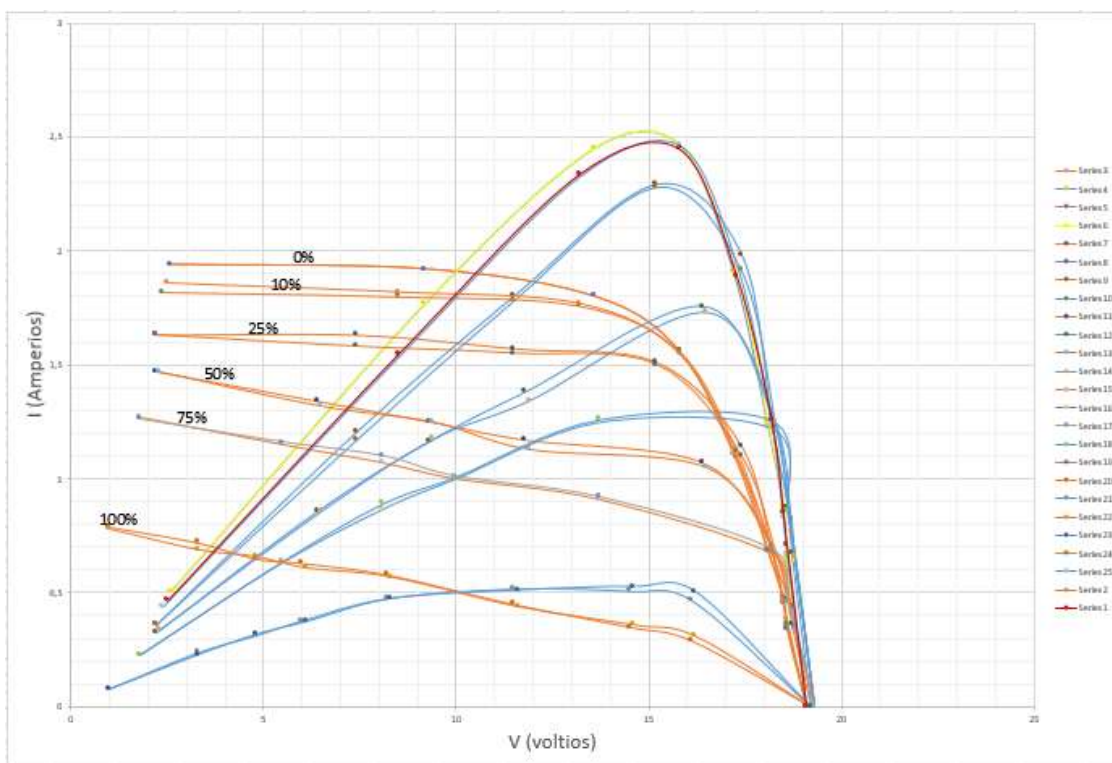
ANEXO B
MEDICIONES

MEDIDAS EXPERIMENTALES

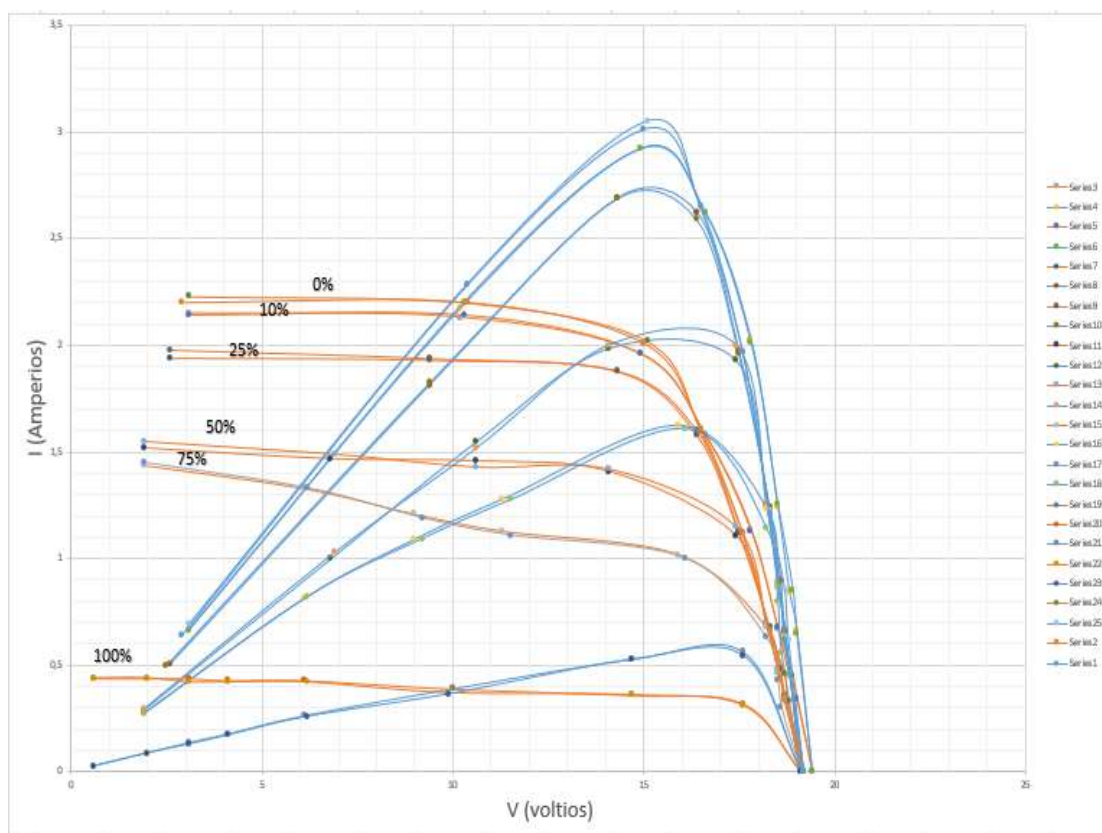
Datos experimentales								
N°	Factores de entrada		Factor de salida					
	Radiación (w/m ²)	Porcentaje de Sombra (%)	Potencia			P _i = V _i I _i		
			V(v)	I(A)	P(w)	V(v)	I(A)	P(w)
1	600	0	15,80	1,56	24,65	15,80	1,56	24,65
		10	15,80	1,56	24,65	15,80	1,55	24,49
		25	15,20	1,51	22,95	15,20	1,50	22,80
		50	16,40	1,07	17,55	16,50	1,05	17,33
		75	13,70	0,91	12,47	13,70	0,92	12,60
		100	11,50	0,45	5,18	14,60	0,36	5,26
2	700	0	14,90	1,96	29,20	14,90	1,96	29,20
		10	15,10	2,02	30,50	15,00	2,01	30,15
		25	14,30	1,88	26,88	14,30	1,88	26,88
		50	14,10	1,41	19,90	14,10	1,42	20,00
		75	15,90	1,02	16,22	16,10	1,00	16,10
		100	17,60	0,32	5,63	17,60	0,31	5,46
3	800	0	15,40	2,01	30,95	15,40	1,99	30,65
		10	15,40	1,99	30,60	15,40	1,99	30,65
		25	14,50	1,89	27,40	14,50	1,87	27,12
		50	14,20	1,35	19,17	14,30	1,36	19,45
		75	16,50	1,01	16,67	16,40	0,99	16,24
		100	15,50	0,29	4,50	15,60	0,30	4,68
4	1000	0	13,90	2,78	38,64	13,90	2,75	38,23
		10	13,30	2,70	35,91	13,30	2,71	36,04
		25	16,00	2,08	33,28	16,00	2,11	33,76
		50	17,00	1,63	27,71	17,00	1,63	27,71
		75	17,90	1,08	19,33	17,90	1,10	19,69
		100	18,40	0,40	7,36	18,40	0,41	7,54

DISTORSIÓN DE CURVAS DEL PANEL POR EFECTO DE SOMBRAS PARCIALES A UNA CÉLULA

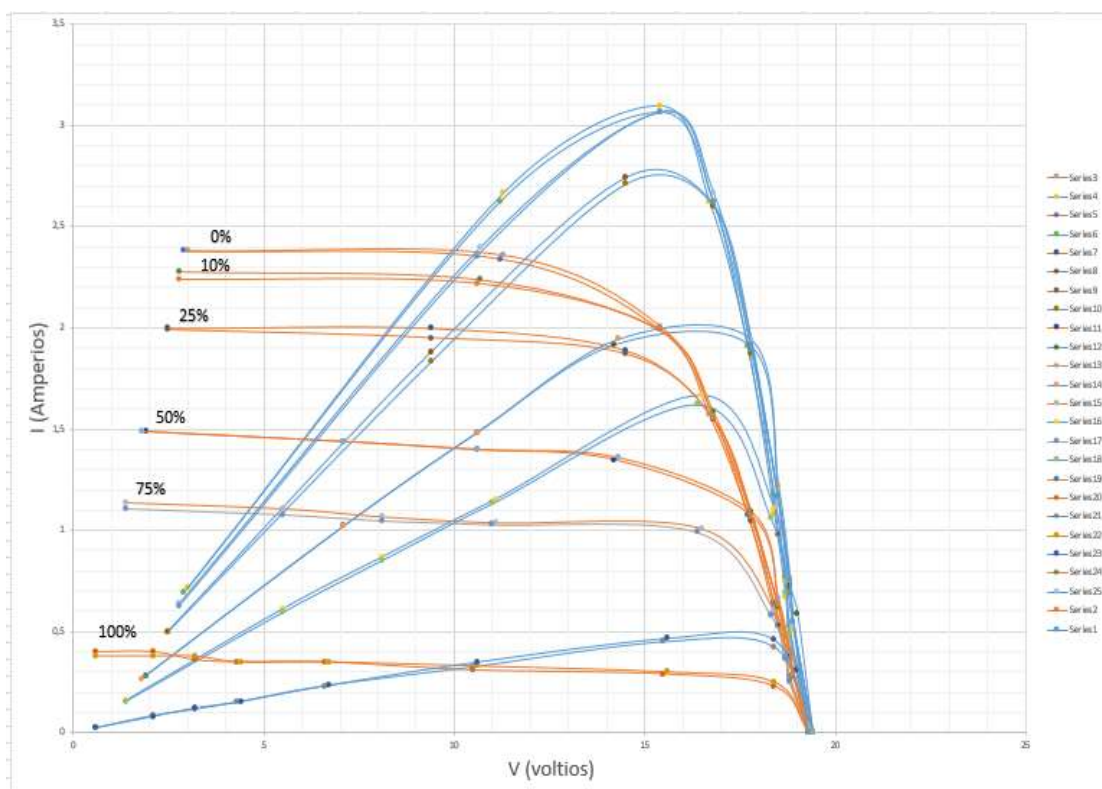
Datos experimentales								
N°	Factores de entrada		Factor de salida					
	Radiación (w/m ²)	Porcentaje de Sombra (%)	Potencia			P _i = V _i I _i		
			V(v)	I(A)	P(w)	V(v)	I(A)	P(w)
1	600	0	15,80	1,56	24,65	15,80	1,56	24,65
		10	15,80	1,56	24,65	15,80	1,55	24,49
		25	15,20	1,51	22,95	15,20	1,50	22,80
		50	16,40	1,07	17,55	16,50	1,05	17,33
		75	13,70	0,91	12,47	13,70	0,92	12,60
		100	11,50	0,45	5,18	14,60	0,36	5,26



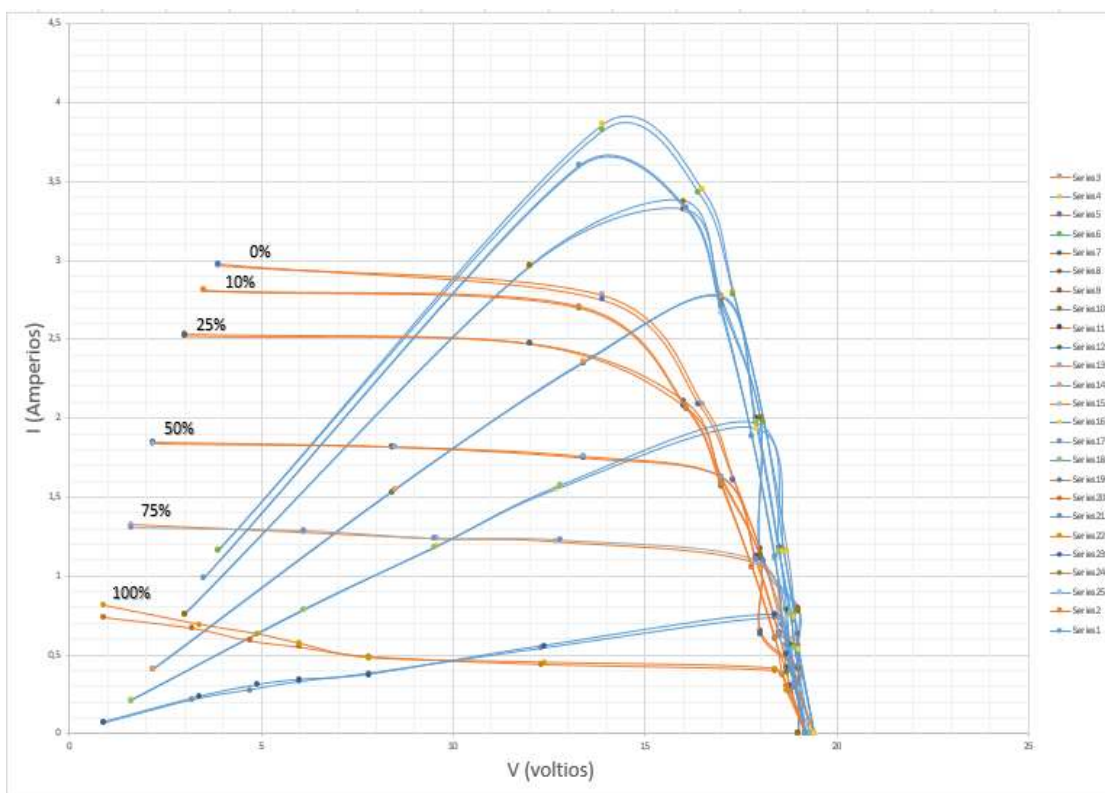
Datos experimentales								
N°	Factores de entrada		Factor de salida					
	Radiación (w/m ²)	Porcentaje de Sombra (%)	Potencia			P _i = V _i I _i		
			V(v)	I(A)	P(w)	V(v)	I(A)	P(w)
2	700	0	14,90	1,96	29,20	14,90	1,96	29,20
		10	15,10	2,02	30,50	15,00	2,01	30,15
		25	14,30	1,88	26,88	14,30	1,88	26,88
		50	14,10	1,41	19,90	14,10	1,42	20,00
		75	15,90	1,02	16,22	16,10	1,00	16,10
		100	17,6	0,32	5,63	17,6	0,31	5,46



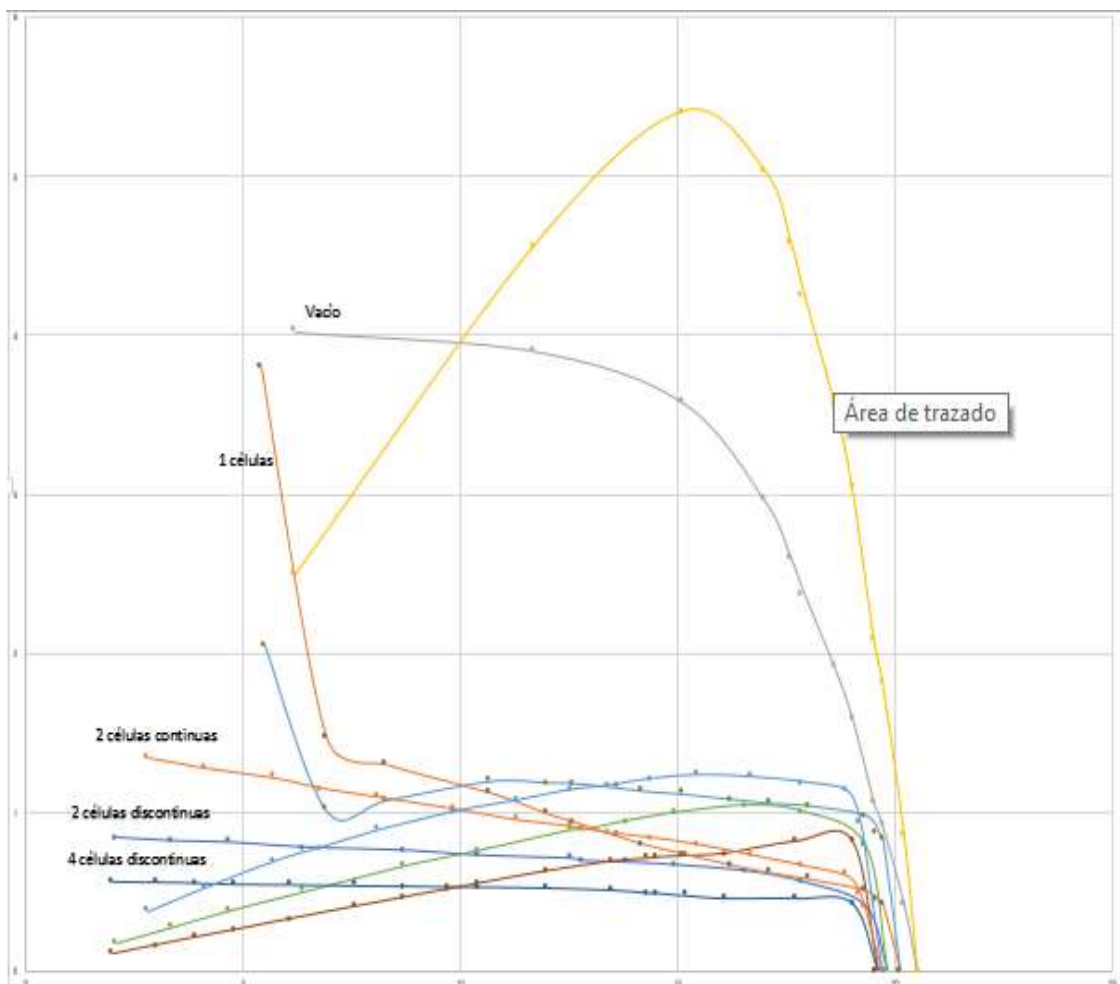
Datos experimentales								
N°	Factores de entrada		Factor de salida					
	Radiación (w/m ²)	Porcentaje de Sombra (%)	Potencia			P _i = V _i I _i		
			V(v)	I(A)	P(w)	V(v)	I(A)	P(w)
3	800	0	15,40	2,01	30,95	15,40	1,99	30,65
		10	15,40	1,99	30,60	15,40	1,99	30,65
		25	14,50	1,89	27,40	14,50	1,87	27,12
		50	14,20	1,35	19,17	14,30	1,36	19,45
		75	16,50	1,01	16,67	16,40	0,99	16,24
		100	15,50	0,29	4,50	15,60	0,30	4,68



Datos experimentales								
N°	Factores de entrada		Factor de salida					
	Radiación (w/m ²)	Porcentaje de Sombra (%)	Potencia			P _i = V _i I _i		
			V(v)	I(A)	P(w)	V(v)	I(A)	P(w)
4	1000	0	13,90	2,78	38,64	13,90	2,75	38,23
		10	13,30	2,70	35,91	13,30	2,71	36,04
		25	16,00	2,08	33,28	16,00	2,11	33,76
		50	17,00	1,63	27,71	17,00	1,63	27,71
		75	17,90	1,08	19,33	17,90	1,10	19,69
		100	18,40	0,40	7,36	18,40	0,41	7,54



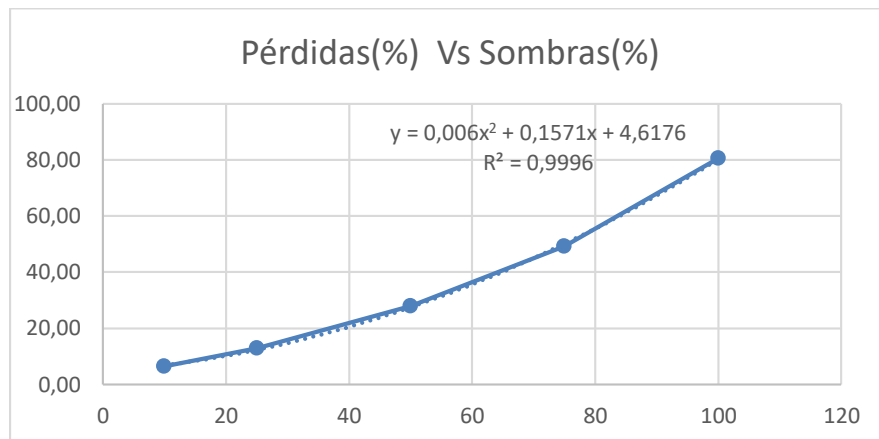
DISTORSIÓN DE LA CURVA DEL PANEL FV POR EFECTO DE SOMBRAS PARCIALES A MÁS CÉLULA



TENDENCIAS DE GRAFICAS

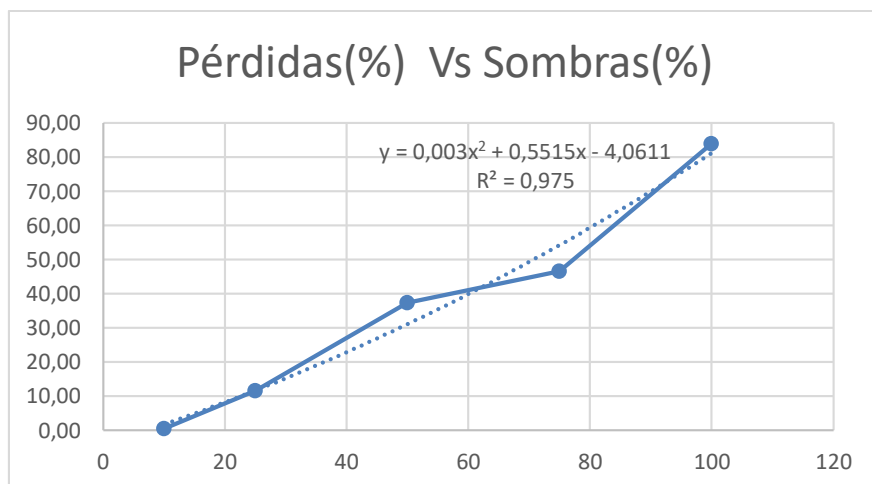
H=1000 W/m²

N°	Sombras (%) x	Pérdidas (%) y
1	10	6,38
2	25	12,78
3	50	27,89
4	75	49,23
5	100	80,61



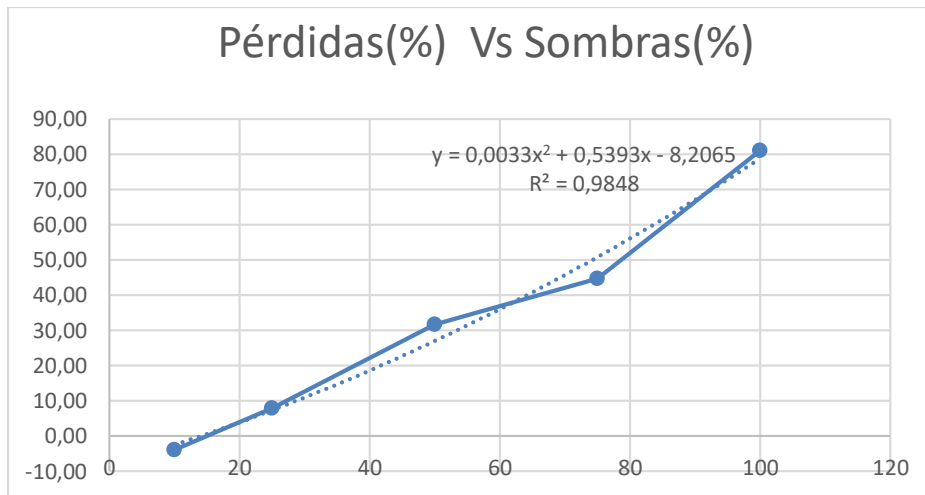
H=800 W/m²

N°	Sombras (%) x	Pérdidas (%) y
1	10	0,49
2	25	11,49
3	50	37,31
4	75	46,59
5	100	83,93



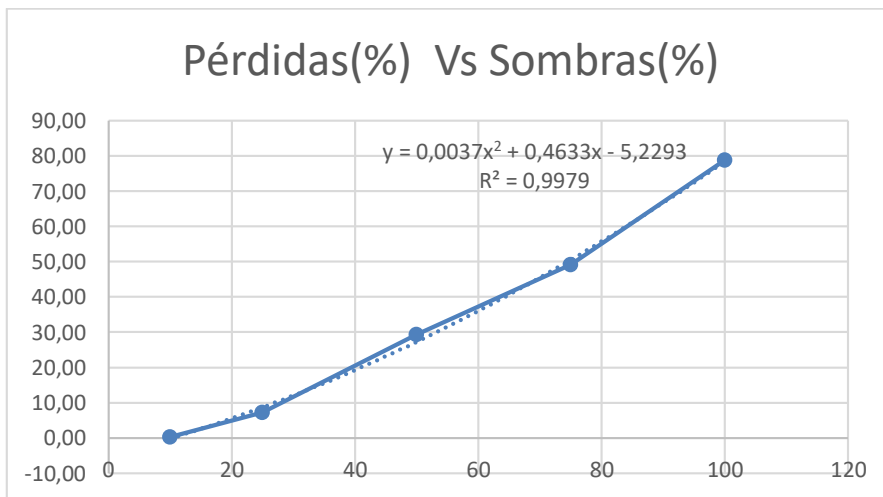
H=700 W/m²

N°	Sombras (%) x	Pérdidas (%) y
1	10	-3,87
2	25	7,95
3	50	31,68
4	75	44,66
5	100	81,03



H=600 W/m²

N°	Sombras (%) x	Pérdidas (%) y
1	10	0,32
2	25	7,18
3	50	29,25
4	75	49,13
5	100	78,82



CÁLCULO DE ERRORES

Para determinar el error que posee el sensor de corriente ACS712 se hizo uso de los siguientes valores medidos:

N	Valor medido (I_i)
1	2,616
2	2,606
3	2,619
4	2,618
5	2,614
6	2,618
7	2,621
8	2,620
9	2,617
10	2,615

Por lo tanto, el VALOR REAL O ACEPTADO de las mediciones es:

$$I = \bar{I} \pm S$$

Reemplazando datos, se tiene:

$$I = 2,616 \pm 4,200 \times 10^{-3} (A)$$

Verificando el valor con una pinza amperimétrica se puede apreciar como el sensor tiene una buena apreciación comparada con el instrumento de medida.

