



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

# ESTUDIO DEL EFECTO DE NUBOSIDAD CONFINADA EN LA EFICIENCIA DE PANELES FOTOVOLTAICOS.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

DANIEL ANTONIO MARTÍNEZ CONTRERAS

PROFESOR GUÍA:  
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM  
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE  
2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: DANIEL A. MARTÍNEZ CONTRERAS  
FECHA: 05/12/2016  
PROF. GUÍA: WILLIAMS CALDERÓN

## ESTUDIO DEL EFECTO DE NUBOSIDAD CONFINADA EN LA EFICIENCIA DE PANELES FOTOVOLTAICOS.

La energía solar fotovoltaica representa una fuente renovable de energía, la cual se obtiene directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado celda fotovoltaica. Debido al amplio potencial de uso que presenta el recurso solar y la creciente demanda energética, es de interés el aprovechar de manera óptima este recurso.

La producción de energía solar es sensible ante muchos factores, desde propiedades de la celda fotovoltaica en sí misma, como factores medioambientales, entre los cuales se presenta la nubosidad, que afecta de manera perjudicial a un sistema de celdas. Las nubes comprenden fenómenos de reflexión y absorción, afectando la radiación incidente en las celdas solares, y así mismo su desempeño. El caracterizar este fenómeno permitiría crear una red de monitorización de energía solar que simulase cómo impactarían las nubes sobre sistemas fotovoltaicos y así, gestionar las fluctuaciones eléctricas, para que la red no se vea afectada de manera significativa.

Este trabajo se centra en el estudio experimental del desempeño de paneles fotovoltaicos sometidos ante una nubosidad controlada.

Para el desarrollo de este estudio se generó nubosidad de manera experimental, que es confinada a un recipiente de vidrio traslucido posicionado entre una fuente de luz y la celda solar. Dicho montaje permite el estudio de la respuesta del panel fotovoltaico ante distintas configuraciones de la nubosidad, donde se varió su distancia a la celda receptora y espesor. La nubosidad generada cuenta con una densidad de  $0,7063 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  y diámetros de gotas de 3 a 5  $[\mu\text{m}]$ .

El montaje experimental construido muestra tener un comportamiento estable, donde los datos medidos presentan una tendencia muy similar a las curvas teóricas que caracterizan el comportamiento del diodo ideal. Los errores para los datos medidos de intensidad de corriente no superan el 6%, mientras el voltaje se mide con una incertidumbre menor al 4%. Se obtienen regresiones de las curvas características con coeficientes de determinación superiores a 0,91.

La radiación percibida por la celda disminuye con el aumento de la distancia entre celda y nubosidad. Son estudiadas distancias de 1, 5,5, 10 y 14,5 [cm] para una nubosidad de espesor 4 [cm]. Si bien la porción de radiación bloqueada muestra un aumento con la distancia, este crecimiento tiende a un valor límite, cercano a un 15%, medido para una separación de 14,5 [cm]. El aumento en la distancia de la nubosidad a la celda se ve reflejado en un escalamiento de la curva característica IV, desplazándola hacia el origen sin alterar su forma.

Aumentos en el espesor nuboso utilizado generan decaimiento en la radiación percibida por la celda fotovoltaica. Se estudian casos de espesores 4, 8, 12 y 16 [cm], ubicados a una distancia de 1 [cm] frente a la celda. Se obtiene que la radiación bloqueada aumenta desde un 4,95% para un espesor de 4 [cm], hasta un 51,73% para un espesor de 16 [cm]. El aumento del espesor en la nubosidad se ve reflejado en un desplazamiento de la curva característica IV de la celda hacia el origen, donde el valor de  $I_{sc}$  disminuye en mayor medida que  $V_{oc}$ , por lo que se aprecia un cambio en la forma de la curva característica, a diferencia del caso de desplazamiento nuboso.

*A mis hijos,  
el tiempo dedicado a este trabajo era de ellos  
y lo cedieron desinteresadamente*

A mis padres y abuelos, por darme todo el amor y apoyo con el que algunas personas solo podrían soñar, porque todo lo que soy es gracias a ellos.

A mi hermana, por traer risas y alegría a todos los días de mi vida, por entenderme y quererme tal como soy.

A mi profesor guía, Williams Calderón, gracias por su valiosa guía y comprensión, por sus palabras de ánimo y hacerme ver el valor de este trabajo.

A mis amigos, mis cardinales, mis compañeros de vida, viajes y jornadas de ocio, gracias por su apoyo en cada etapa y por permitirme crecer como persona junto a ustedes.

A Camila, mi mejor amiga, mi compañera de aventuras, por apoyarme en las buenas y malas, por tu contribución a mis proyectos universitarios y apoyo personal, mucho de este trabajo no hubiera sido posible sin tu ayuda.

A Rocío, Carlos y mi estimadísimo Hernán Mora, por permitirme tantas segundas oportunidades.

A mis muchachos del roble, gracias, mil gracias, gracias totales, por todo el tiempo compartido, desde frías jornadas matutinas compartiendo un café, hasta sedientas tardes de 35°, los años de ingeniería no habrían sido lo mismo sin su presencia. Me llevo de su parte una mochila llena recuerdos y cajetillas vacías, les deseo el mayor de los éxitos en todos los proyectos que cursen.

A los profesores de los cuales fui profesor auxiliar, donde destaco los cuatro años de apoyo docente al curso de mecánica dictado por Ricardo Muñoz, no tengo palabras para agradecerle lo feliz que me hizo participar del proceso de aprendizaje de tantos alumnos, gracias por permitirme desarrollar una de mis más grandes pasiones a lo largo de estos años.

A Mondino de Mondovi, por permitirme el uso de su taller y experiencia para la realización de este trabajo, su excelente disposición y paciencia me permitieron dar el primer paso en este proyecto.

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivos .....	1
1.1.1	Objetivo General.....	1
1.1.2	Objetivos Específicos.....	2
1.2	Alcances .....	2
2	Metodología.....	3
3	Antecedentes.....	4
3.1	Microfísica de nubes cálidas .....	4
3.2	Aerosoles .....	5
3.3	Estudios radiativos .....	6
3.4	Luz y Efecto fotoeléctrico .....	7
3.5	Materiales Semiconductores.....	8
3.5.1	Dopaje .....	9
3.5.2	Concentración de equilibrio de portadores .....	10
3.5.3	Absorción Luminosa.....	10
3.5.4	Tipos de Recombinación.....	10
3.5.5	Movimiento de portadores .....	11
3.5.6	Difusión.....	11
3.5.7	Transporte por Arrastre.....	12
3.6	Juntas PN.....	12
3.6.1	Formación de una Junta PN .....	12
3.6.2	Diodos PN .....	13
3.6.3	Polarización en uniones PN.....	13
3.6.4	Ecuación del Diodo Ideal .....	14
3.7	Celdas Solares .....	15
3.7.1	Probabilidad de Colección .....	16
3.7.2	Eficiencia cuántica.....	16
3.7.3	Respuesta espectral.....	16
3.7.4	Efecto fotoeléctrico.....	17
3.7.5	Curva IV.....	18

3.7.6	Corriente de cortocircuito .....	18
3.7.7	Voltaje de circuito abierto .....	19
3.7.8	Factor de llenado .....	20
3.7.9	Eficiencia Solar .....	20
3.7.10	Efecto de la intensidad Luminosa.....	21
4	Montaje Experimental.....	22
4.1	Componentes .....	22
4.2	Montaje .....	24
4.3	Mediciones .....	25
4.4	Análisis del montaje.....	27
4.4.1	Radiación percibida por la celda en recepción directa .....	27
4.4.2	Recepción a través del vidrio.....	32
4.4.3	Recepción a través de la nubosidad.....	33
4.4.4	Regresión Lineal.....	34
5	Resultados .....	35
5.1	Caso 1: Recepción directa .....	35
5.2	Caso 2: Recepción a través del recipiente .....	36
5.3	Caso 3: Interferencia nubosa .....	38
5.3.1	Caso 3.1000.....	40
5.3.2	Caso 3.1100.....	42
5.3.3	Caso 3.1110.....	43
5.3.4	Caso 3.1111 .....	44
5.3.5	Caso 3.0100.....	46
5.3.6	Caso 3.0010.....	47
5.3.7	Caso 3.0001 .....	48
6	Análisis de Resultados .....	50
7	Conclusiones.....	60
	Bibliografía.....	61
	Anexo A: Plano del recipiente contenedor.....	63
	Plano de conjunto .....	63
	Plano de cuerpo principal .....	64
	Plano de tapa.....	65

Anexo B: Datos Medidos .....	66
Caso 1 .....	66
Caso 2 .....	67
Caso 3.1000.....	68
Caso 3.1100.....	69
Caso 3.1110.....	70
Caso 3.1111.....	71
Caso 3.0100.....	72
Caso 3.0010.....	73
Caso 3.0001.....	74

Tabla 1: Resumen de mediciones, Caso 1 .....	36
Tabla 2: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 1 .....	36
Tabla 3: Resumen de mediciones, Caso 2.....	37
Tabla 4: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 2 .....	38
Tabla 5: Resumen de valores calculados para determinar la densidad de la nube .....	39
Tabla 6: Resumen de mediciones, Caso 3.1000 .....	41
Tabla 7: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 3.1000 .....	41
Tabla 8: Resumen de mediciones, Caso 3.1100 .....	42
Tabla 9: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 3.1100 .....	43
Tabla 10: Resumen de mediciones, Caso 3.1110 .....	44
Tabla 11: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 3.1110 .....	44
Tabla 12: Resumen de mediciones, Caso 3.1111 .....	45
Tabla 13: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 3.1111 .....	45
Tabla 14: Resumen de mediciones, Caso 3.0100 .....	46
Tabla 15: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 3.0100 .....	47
Tabla 16: Resumen de mediciones, Caso 3.0010 .....	48
Tabla 17: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 3.0010 .....	48
Tabla 18: Resumen de mediciones, Caso 3.0001 .....	49
Tabla 19: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 3.0001 .....	49
Tabla 20: Fracción de radiación bloqueada según posición.....	56
Tabla 21: Fracción de radiación bloqueada según espesor total. ....	59

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

---

Figura 1: Metodología, diagrama de flujo.....	3
Figura 2: Diámetros típicos de gotas condensables y aerosoles en la atmósfera .....	4
Figura 3: Representación esquemática de enlaces covalentes en la estructura del silicio .....	8
Figura 4: Esquema de bandas de energía .....	9
Figura 5: Semiconductores dopados, Campo eléctrico y diagrama de energía en una junta p-n..	13
Figura 6: Zona de agotamiento y diagramas de banda para distintos tipos de polarización .....	14
Figura 7: Esquema de una celda solar y sus componentes.....	15
Figura 8: Respuesta espectral para una celda solar de silicio bajo vidrio .....	17
Figura 9: Curvas características, IV y potencia, de una celda solar .....	18
Figura 10: Panel fotovoltaico. ....	22
Figura 11: Foco Led Plafon.....	22
Figura 12: Humidificador Mini Mist .....	23
Figura 13: Humidificador WETY.....	23
Figura 14: Recipiente. ....	23
Figura 15: Medidor amperímetro/voltímetro YB27VA.....	24
Figura 16: Potenciómetro B500K.....	24
Figura 17: Esquema eléctrico del montaje. ....	24
Figura 18: Esquema lateral del montaje. ....	25
Figura 19: Configuración del circuito eléctrico, caso Isc.....	26
Figura 20: Configuración del circuito eléctrico, caso Voc.....	27
Figura 21: Disposición de la celda solar frente al panel led.....	27
Figura 22: Disposición de la celda solar frente al panel led, vista superior. ....	28
Figura 23: Distribución espectral, led 5500K.....	29
Figura 24: Aproximación de la distribución espectral para 5500K .....	30
Figura 25: Esquema de radiación incidente, interacción con el recipiente contenedor .....	32
Figura 26: Esquema de radiación incidente, interacción con recipiente y nubosidad. ....	33
Figura 27: Caso 1, curva característica IV de la celda fotovoltaica para recepción directa.....	35
Figura 28: Caso 1, curva de potencia de la celda fotovoltaica para recepción directa. ....	36
Figura 29: Caso 2, curva característica IV del panel fotovoltaico.....	37
Figura 30: Caso 2, curva de potencia del panel fotovoltaico. ....	37
Figura 31: Relación entre notación de caso 3 y forma de la nubosidad.....	38
Figura 32: Efecto de gotas adheridas al recipiente en el voltaje medido. ....	39
Figura 33: Efecto de gotas adheridas al recipiente en la corriente medida. ....	40
Figura 34: Curva IV para la configuración 3.1000.....	40
Figura 35: Curva de potencia para la configuración 3.1000 .....	41
Figura 36: Curva IV para la configuración 3.1100.....	42
Figura 37: Curva de potencia para la configuración 3.1100 .....	42
Figura 38: Curva IV para la configuración 3.1110.....	43
Figura 39: Curva de potencia para la configuración 3.1110 .....	43
Figura 40: Curva IV para la configuración 3.1111 .....	44

Figura 41: Curva de potencia para la configuración 3.1111 .....	45
Figura 42: Curva IV para la configuración 3.0100.....	46
Figura 43: Curva de potencia para la configuración 3.0100 .....	46
Figura 44: Curva IV para la configuración 3.0010.....	47
Figura 45: Curva de potencia para la configuración 3.0010 .....	47
Figura 46: Curva IV para la configuración 3.0001 .....	48
Figura 47: Curva de potencia para la configuración 3.0001 .....	49
Figura 48: Comparación de eficiencia y radiación incidente. ....	50
Figura 49: Contraste de datos IV medidos para casos sin interferencia nubosa .....	51
Figura 50: Contraste de curvas de tendencia IV para casos sin interferencia nubosa. ....	51
Figura 51: Contraste de datos medidos, potencia para casos sin interferencia nubosa.....	52
Figura 52: Contraste de curvas tendencias para potencia, casos sin interferencia nubosa. ....	52
Figura 53: Comparación de datos medidos, curvas IV, cambio en la posición de nubosidad. ....	54
Figura 54: Comparación de tendencias, curvas IV, cambio en la posición de nubosidad .....	54
Figura 55: Comparación de datos medidos, curvas de potencia, cambio en la posición .....	55
Figura 56: Comparación de tendencias, curvas de potencia, cambio en la posición.....	55
Figura 57: Comparación de datos medidos, curvas IV, aumento de espesor nuboso.....	57
Figura 58: Comparación de tendencias, curvas IV, aumento de espesor nuboso.....	57
Figura 59: Comparación de datos medidos, curvas de potencia, aumento de espesor nuboso. ....	58
Figura 60: Comparación de tendencias, curvas de potencia, aumento de espesor nuboso. ....	58

# 1 Introducción

La energía solar fotovoltaica representa una fuente renovable de energía, obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica.

Con un gran potencial de uso y generando recursos para distintas aplicaciones como agricultura, industria, telecomunicaciones o servicios públicos, la energía solar fotovoltaica se presenta como una de las más prometedoras en el aprovechamiento del recurso solar que día a día recibe el planeta, si a esto sumamos los grandes avances de la última década en el desarrollo de células fotovoltaicas [1], y que Chile cuenta con una de las mejores condiciones del mundo en términos de radiación solar [2], el estudio en profundidad de este recurso como solución ante la creciente demanda energética cobra real importancia.

El rendimiento, para celdas hechas a base de silicio, es capaz de alcanzar aproximadamente un 20%. Sin embargo, en la práctica esta producción de energía no solo se ve afectada por propiedades de la celda en sí misma, sino que también se verá opacada por factores medioambientales; que incluyen, elevación solar, nubosidad, columna de ozono estratosférico, masa de agua precipitable y espesor óptico de aerosoles.

De los factores antes mencionados, la nubosidad afecta de manera poco predecible y perjudicial a los sistemas fotovoltaicos. Las nubes comprenden fenómenos de reflexión y refracción, dependientes de la densidad y espesor de las mismas afectando la radiación incidente en las celdas solares, y así mismo su desempeño.

Al poder caracterizar este fenómeno, se podría crear una red de monitorización de energía solar que simulase cómo impactarían las nubes sobre un gran sistema fotovoltaico, permitiendo diseñar estrategias para mejorar la gestión de las fluctuaciones eléctricas, de modo que la red no se vea afectada significativamente de manera negativa.

## 1.1 Objetivos

A continuación, se detallan los objetivos, general y específicos de este trabajo de título.

### 1.1.1 Objetivo General

El objeto general de este trabajo corresponde al estudio del impacto que genera una nubosidad artificial controlada y sus distintas configuraciones, en el desempeño de paneles fotovoltaicos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son:

- Recopilación de antecedentes que permitan comprender y analizar la interacción entre la nubosidad y la celda solar.
- Diseñar y desarrollar un sistema que sustente una nube confinada frente al panel fotovoltaico.
- Obtener mediciones de voltaje e intensidad de corriente generados por el panel, para distintas condiciones artificiales de la nube.
- Estudiar la variación de la intensidad de corriente y voltaje en el panel respecto de la posición y espesor de la nube confinada.

### 1.2 Alcances

El presente trabajo de memoria se enmarca en la realización de experimentos y mediciones de los parámetros pertinentes a estos. Se estudian configuraciones que involucren la alteración del espesor y posición de la nubosidad. Los espesores corresponden a 4, 8, 12 y 16 [cm], dispuestos a 1 [cm] de la celda solar. Las variaciones de posición representan distancias de 1, 5,5, 10 y 14,5 [cm] con respecto a la celda solar, con un espesor nuboso constante de 4 [cm].

## 2 Metodología

Para el desarrollo del presente estudio, se sigue la siguiente metodología:

Se define el problema a estudiar como la interacción de nubosidad, generada experimentalmente, con la radiación incidente sobre una celda fotovoltaica, para lo cual se necesita crear un montaje capaz de generar una nube artificial de manera controlada.

Esto requiere un estudio sobre los mecanismos de generación de las nubes y los modelos utilizados en la literatura para describir su interacción con la radiación percibida a nivel de superficie.

Los modelos radiativos incluyen los efectos de diversos factores meteorológicos, como aerosoles, vapor de agua, elevación solar y nubosidad, mientras el proceso de formación de gotas se verá afectado por variables como la temperatura, humedad relativa y presencia de aerosoles, por lo tanto, se deben plantear simplificaciones en el montaje que permitan controlar estas variables.

Se procede a diseñar y desarrollar un equipo experimental, dadas las simplificaciones anteriores, que admita variaciones en el espesor total de nubosidad generada y su distancia al panel receptor.

Se realizan las mediciones experimentales de voltaje e intensidad de corriente que permitan confeccionar las curvas características de la celda, para distintas configuraciones en la nubosidad

Se analizan las posibles fuentes de error en las mediciones, además de generar las líneas de tendencia para las curvas características del panel fotovoltaico por medio de regresiones lineales.

Se estudia la dependencia de los parámetros relacionados a la recepción de radiación incidente para el panel fotovoltaico

Un esquema de la metodología puede apreciarse en la figura 1, donde se presenta el diagrama de flujo de esta.

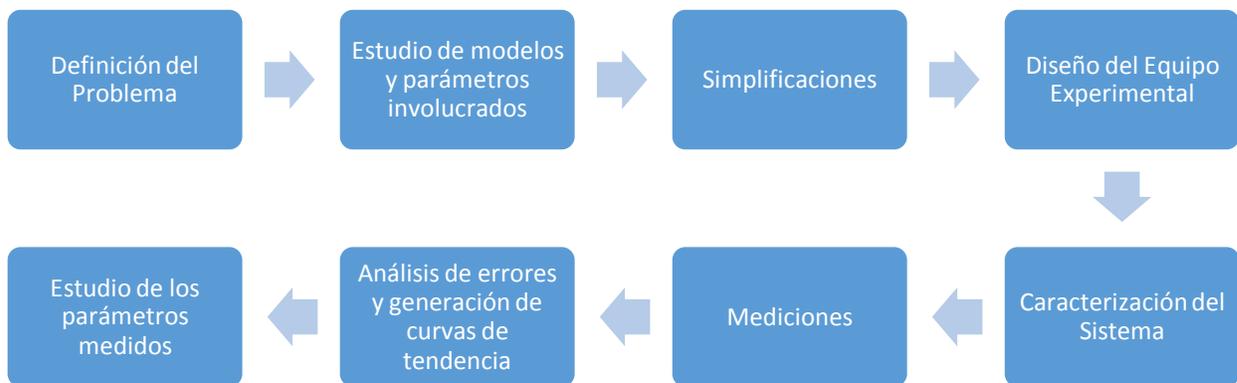


Figura 1: Metodología, diagrama de flujo.

### 3 Antecedentes

En este capítulo se expone el sustento conceptual de fenómenos relacionados con nubosidad y radiación que permitan comprender el escenario a analizar.

#### 3.1 Microfísica de nubes cálidas

Las gotas líquidas en una nube típicamente comienzan como moléculas condensadas en torno a núcleos de condensación, que dimensionalmente son del orden de décimas de micrones. Una vez que comienza la aparición de gotas líquidas, éstas se encuentran en un orden de  $\sim 1 - 100 [\mu m]$  de diámetro [3]. Su crecimiento puede continuar hasta convertirse en partículas precipitables, que alcanzan unos cientos de micrones de diámetro o gotas de lluvia, de algunos cientos de miles de micrones. Estos amplios rangos de partículas presentes en la atmósfera se pueden apreciar comparativamente en la figura 2.

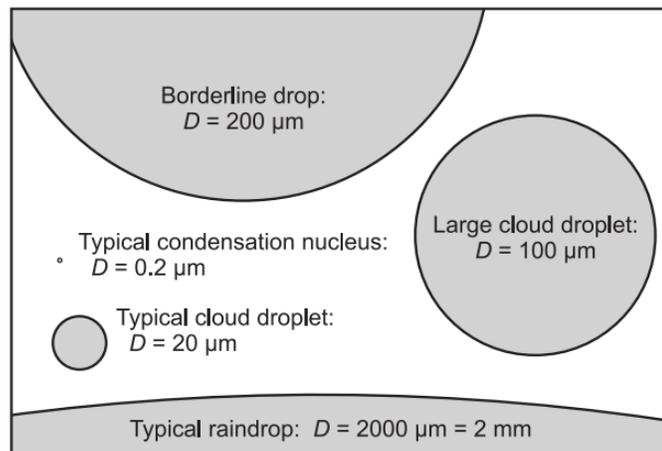


Figura 2: Diámetros típicos de gotas condensables y aerosoles en la atmósfera [3]

#### Nucleación de gotas

Las partículas que constituyen una nube se crean por un proceso conocido como nucleación, en el que las moléculas de agua cambian de un estado de menor a mayor orden.

Por ejemplo, las moléculas de vapor en el aire pueden unirse por colisiones formando una gota en fase líquida. Para ver cómo lleva a lugar este proceso, es necesario tener en cuenta las condiciones necesarias para la formación de una gota de agua pura de vapor. Este caso se llama nucleación homogénea, para distinguirlo del caso de nucleación heterogénea, que se refiere a la colección de moléculas pertenecientes a una sustancia externa. Si el embrión de gota de agua pura tiene un radio  $R$ , entonces la energía neta requerida para llevar a cabo su nucleación es:

$$\Delta E = 4\pi R^2 \sigma_{vl} - \frac{4}{3}\pi R^3 n_l (\mu_v - \mu_l) \quad (3.1)$$

Donde el primer término de la derecha representa la energía necesaria para crear una interfaz líquido-vapor alrededor de la gota, el factor  $\sigma_{vl}$  es el trabajo requerido para crear un área unitaria de la interfaz, llamado tensión de superficie. El segundo término a la derecha de (3.1) es el cambio de energía asociado con el cambio de fase de líquido a vapor, expresando el cambio en la energía libre de Gibbs del sistema, donde la energía libre de una molécula simple de vapor es  $\mu_v$  y la de la molécula líquida es  $\mu_l$ . El factor  $n_l$  es el número de moléculas de agua por unidad de volumen en la gota.

A partir de lo expuesto, se puede deducir que la formación de gotas de mayores dimensiones se ve beneficiada por la presencia de una gota inicial de mayor tamaño, al requerirse colisiones entre moléculas de agua líquida, esto resulta ser un proceso aleatorio (nucleación homogénea). Este proceso en la práctica ocurre con mayor facilidad gracias a la presencia de aerosoles en la atmósfera, en torno a los cuales la colisión es más favorable debido a que tienen un tamaño mayor a las gotas de agua (nucleación heterogénea). Cuando el núcleo de condensación es insoluble en agua, la física que rige el desarrollo de un embrión de gota tiene los mismos principios que en la nucleación homogénea.

## 3.2 Aerosoles

Se denomina aerosol a un coloide de partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas. El tamaño de las partículas puede ser desde 0,002 [ $\mu\text{m}$ ] a más de 100 [ $\mu\text{m}$ ], esto es, desde unas pocas moléculas hasta el tamaño en que dichas partículas no pueden permanecer suspendidas en el gas al menos durante unas horas [4].

Incluye polvo, cenizas, cristales de sal oceánica, esporas, bacterias, entre otros y su variación puede producir efectos a nivel climático incluso en cortos periodos de tiempo, por ejemplo, luego de una erupción volcánica.

En el largo plazo, los efectos de los aerosoles son bastante equilibrados debido al efecto natural de limpieza atmosférica, aunque este proceso nunca es completo. Tienen el potencial de influir fuertemente en la cantidad de radiación de onda corta que llega a la superficie terrestre.

Por ejemplo, sulfatos y nitratos puros reflejan casi toda la radiación y enfrían la atmósfera, en cambio el carbón negro absorbe la radiación de manera eficiente y calientan la atmósfera, pero también dan sombra a la superficie. El polvo influye de manera variable de acuerdo a la composición que este presente.

### 3.3 Estudios radiativos

El descubrimiento de las líneas de absorción del espectro solar, marcó el comienzo de los estudios sobre la radiación proveniente del sol, dicho descubrimiento fue realizado por Fraunhofer en el año 1814, estudios posteriores logran establecer que cada elemento tendrá un comportamiento propio con respecto a la absorción y emisión de energía en distintas longitudes de onda.

Los modelos de transferencia radiativa aplicados a la atmósfera, nacen en el año 1950 cuando Chandrasekhar describe un grupo de ecuaciones que muestran la variación de la radiación al interactuar con la atmósfera, descrita como un medio constituido por compuestos que presentan efectos de emisión, dispersión y absorción [5].

Estudios posteriores se dedicaron a caracterizar el comportamiento de los principales componentes de la atmósfera con la radiación incidente, entre ellos se encuentran el oxígeno, vapor de agua y dióxido de carbono. (Yamamoto, 1962) [6].

El buen funcionamiento de los modelos que se han formulado con el pasar de los años se ve fuertemente afectado, tanto por la información con respecto a la composición de la columna atmosférica, como por el modelamiento del efecto de cada componente de esta. Entre distintos modelos de transferencia radiativa para una misma columna, se pueden hallar diferencias considerables, un ejemplo de esto podría ser para los modelos de Rigollier (2000) [7] y Bird and Hulstrom (1981) [8], que pueden presentar diferencias de hasta un 20% entre sus resultados.

Existen dos modelos que buscan el análisis de la radiación incidente mediante el uso de imágenes satelitales, lo cual puede representar una ventaja en cuanto al seguimiento de datos, el primero de ellos incorpora métodos estadísticos para vincular las mediciones satelitales, con las observaciones a nivel de superficie terrestre (Tarpley, 1979) [9], el segundo de estos métodos (Gautier et al., 1980) [10] modela desde un punto de vista más físico estos sucesos, incorporando un análisis tanto para cielo despejado, como en presencia de nubosidad.

Gautier et al. (1980) calcula la radiación incidente bajo el supuesto de que existe conservación en la radiación para la columna atmosférica. En el modelo, para su versión de cielo despejado, permite el cálculo de la radiación incidente a nivel de superficie ( $R_{CD} \downarrow$ ) como:

$$R_{CD} \downarrow = R_{TOA} \downarrow (1 - A_{atm-dir}) \cdot [1 - \alpha(u)] (1 + A_G \cdot A_{atm-dif}) \quad (3.2)$$

Cuando se busca considerar el efecto de nubosidad, el modelo incorpora efectos correspondientes a la reflexión y absorción de la nube, así la radiación incidente a nivel de superficie ( $R \downarrow$ ) se calcula como sigue:

$$R \downarrow = R_{TOA} \downarrow (1 - A_{atm-dir}) \cdot [1 - \alpha(u)_t](1 - A_C) \cdot (1 - abs) \cdot [1 - \alpha(u)_b] \quad (3.3)$$

Donde

- $R_{TOA} \downarrow$  : radiación solar incidente en el tope de la atmósfera
- $A_{atm-dir}$  : coeficiente de reflexión de la atmósfera para radiación directa
- $A_{atm-dif}$  : coeficiente de reflexión de la atmósfera para radiación difusa
- $\alpha(u)$  : coeficiente de absorción de la radiación incidente para una columna atmosférica con una cantidad total  $u$  de vapor de agua
- $t, b$  : subíndices sobre o bajo la nube
- $A_G$  : albedo del suelo
- $A_C$  : albedo de la nube
- $abs$  : coeficiente de absorción de la nube.

La aplicación de este modelo requiere conocer la cantidad de agua presente en la vertical, la cual se puede obtener por una parametrización según la temperatura de rocío a nivel de superficie. Los albedos correspondientes a la nube y el suelo requieren ser despejados de un balance entre la radiación devuelta al espacio y las mediciones de este valor por medio del uso de satélites. Los coeficientes  $A_{atm-dir}$  y  $A_{atm-dif}$  son extraídos de Coulson (1959) [11] y los coeficientes de absorción de vapor de agua corresponden a los de Yamamoto (1962) [6].

### 3.4 Luz y Efecto fotoeléctrico

La luz es descrita por el espectro electromagnético como una onda de longitud característica según lo observado por Thomas Young en 1801 mientras estudiaba el principio de interferencia, esto permite considerar la luz proveniente del sol como una forma de radiación electromagnética. Pero no fue hasta que Einstein explicó el efecto fotoeléctrico en 1920, sumado al trabajo de Plank (1905), que se permitió ver la luz como paquetes o partículas de energía, llamados fotones, a los que se le asocia una energía en función de su longitud de onda.

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3.4)$$

El efecto fotoeléctrico corresponde a la ocurrencia de liberación de electrones, en ciertos metales y semiconductores, cuando son impactados por un haz luminoso. Este comportamiento fue observado primeramente por Heinrich Hertz, que enfrentó dos placas metálicas a radiación, sin tener una teoría que explicara el fenómeno observado.

Los electrones dentro de un material serán capaces de moverse entre distintos estados de energía por medio del aporte energético de fotones, por tanto, es el efecto fotoeléctrico el mecanismo que permite la utilización de un material semiconductor, como generador de un flujo de electrones. Este movimiento de cargas puede ser conducido fuera de la estructura del material y ser regresado al mismo mediante un circuito externo.

### 3.5 Materiales Semiconductores

El comportamiento eléctrico de los materiales permite la agrupación de estos en tres grupos distintos: conductores, semiconductores y aislantes. Los semiconductores en particular presentan características en su estructura cristalina que posibilitan la manipulación de su comportamiento. Materiales semiconductores corresponden a: Arsénico, Antimonio, Boro, Silicio, Galio, Indio, Boro, Fosforo y Aluminio. Estas estructuras se comportan como aisladores a bajas temperaturas, pero pueden conducir a temperaturas elevadas, debido a que se rompen enlaces covalentes, permitiendo el libre movimiento de electrones y su participar en la conducción. Solo bajo una condición de cero absoluto la conducción es nula en su totalidad [12].

Las redes cristalinas en estos materiales pueden formarse en uno o más patrones debido a la posibilidad de sus átomos para enlazarse de formas amorfas, a pesar de esto, las propiedades que resaltan de estos materiales se dan bajo estructuras monocristalinas de elevada pureza, donde los electrones forman enlaces covalentes bajo un patrón sumamente regular.

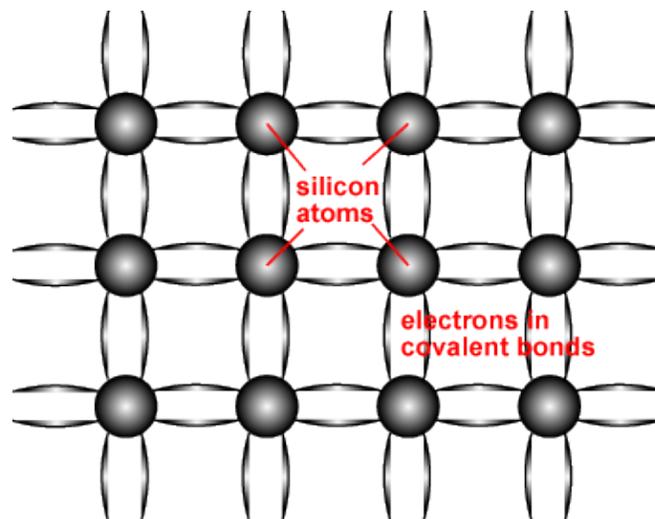


Figura 3: Representación esquemática de enlaces covalentes en la estructura cristalina del silicio [13].

Estos arreglos permiten la existencia de bandas para distintos estados de energía de los electrones involucrados en la estructura. Como se mencionó anteriormente, los niveles de energía admisibles para el electrón no presentan continuidad, por lo cual existirán zonas energéticas donde no se tiene presencia de electrones, también conocidas como zonas prohibidas.

La cantidad mínima de energía para que un electrón se libere representa el denominado “gap de banda” ( $E_g$ ) del semiconductor, que corresponde a la energía necesaria para romper un enlace covalente. Los mecanismos que permiten este cambio de energía en los electrones son la luz (efecto fotoeléctrico) o la temperatura (leyes de la termodinámica). En los semiconductores  $E_g$  es del orden de 1 a 2 [eV]. Cuando un electrón es liberado, deja atrás su espacio vacante, a este se le llama “hueco” y se trata de forma similar al electrón, pero de carga positiva.

El menor nivel de energía de un semiconductor “gap de valencia” ( $E_v$ ) corresponde a la energía que se tiene a nivel del enlace covalente, por otro lado, el nivel de liberación “gap de conducción” ( $E_c$ ) corresponde a la energía mínima que posee un electrón al presentarse en la banda de conducción, el gap de banda ( $E_g$ ) vendrá dado por la diferencia entre estos estados de energía, es decir,  $E_g = E_c - E_v$ .

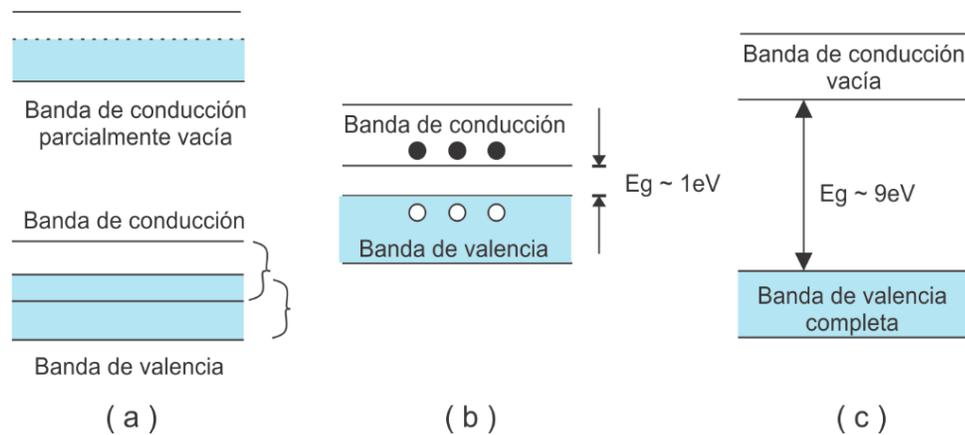


Figura 4: Esquema de bandas de energía para (a) conductor con sus dos posibles presentaciones, banda de conducción parcialmente llena o solapamiento, (b) semiconductor y (c) aislante (Fuente: Elaboración propia)

La concentración intrínseca de portadores ( $n_i$ ) corresponde al número de electrones en la banda de conducción o, lo que es equivalente, los huecos en la banda de valencia, los cuales a su vez dependen del gap de banda, es decir, de la dificultad de liberar electrones, cantidades que se ven reflejadas en la eficiencia de la celda. Los materiales son llamados intrínsecos si no tienen impurezas que afecten la concentración o equivalentemente, si existe igualdad entre la cantidad de electrones y huecos a temperatura constante [14].

### 3.5.1 Dopaje

Se utiliza el dopaje para variar la cantidad de electrones y huecos en el semiconductor. Si se dopa por ejemplo materiales del grupo IV con materiales del grupo V, se crean materiales de tipo-n (aumenta la cantidad intrínseca de electrones, volviéndolos portadores mayoritarios), por otro lado, el dopaje con materiales del grupo III crea material de tipo-p (aumenta el número de huecos).

### 3.5.2 Concentración de equilibrio de portadores

Se le da este nombre a la cantidad de portadores que se encuentran en las bandas de conducción y valencia, bajo condiciones de no polarización externa. Esta concentración puede ser aumentada mediante doping. Para los transportadores mayoritarios, la concentración de equilibrio es equivalente a la concentración intrínseca más el número de portadores libres adheridos por dopaje, el cual suele ser en la mayoría de los casos, de varios órdenes de magnitud mayor al del semiconductor puro. Por lo mencionado, el número de portadores mayoritario tiende a ser aproximadamente igual al adherido por dopaje.

### 3.5.3 Absorción Luminosa

Los fotones pueden ser absorbidos, reflejados o transmitidos, siendo los últimos dos procesos considerados como pérdidas. Un factor clave en determinar si un fotón es absorbido o no, es la energía asociada a este. Se puede dividir la posible acción del fotón en tres grupos, de acuerdo a tu nivel energético

$E_{\text{fot}} < E_G$  : Los fotones con nivel energético menor al gap de banda interactúan de manera débil con el semiconductor, atravesándolo sin lograr la transmisión de energía.

$E_{\text{fot}} = E_G$  : Los fotones con nivel energético igual al gap de banda interactúan de manera eficiente con el semiconductor, creando un par electrón-hueco.

$E_{\text{fot}} > E_G$  : Los fotones con nivel energético mayor al gap de banda interactúan de manera fuerte con el semiconductor, creando un par electrón-hueco, pero liberando el exceso de energía en forma térmica.

Los portadores generados por absorción lumínica son varios órdenes de magnitud menores a los portadores mayoritarios presentes por dopaje [14].

### 3.5.4 Tipos de Recombinación

Los electrones que se pueden desplazar en la banda de conducción se encuentran en un estado meta-estable, por lo cual, tenderán a encontrar su estado de equilibrio luego de perder energía, moviéndose a un espacio vacante en la banda de valencia, representado por un hueco. Este proceso se llama recombinación y se puede presentar de tres maneras básicas en semiconductores [15]:

#### Recombinación radiativa:

El electrón excitado pierde energía liberando un fotón, con lo cual puede volver a un espacio vacante y unirse con un hueco. El fotón liberado tiene energía similar al gap de banda, por lo cual luego es absorbido débilmente.

#### Recombinación de Auger:

Involucra la interacción de tres partículas, dos electrones en la banda de conducción y un hueco. Un electrón primario entrega energía a uno secundario, con lo cual el secundario llega a un nivel energético superior en la banda de conducción y el primario logra disminuir su energía para descender a la banda de valencia y recombinarse con un hueco. El electrón secundario pierde gradualmente su energía termal hasta volver al borde de la banda de conducción.

#### Recombinación de Shockley-Read-Hall:

Ocurre cuando un electrón (o hueco), por defectos en la red, se encuentra atrapado en una zona energética entre la banda de conducción y de valencia (zona prohibida). Los defectos en el enrejado pueden encontrarse de manera natural, o inducidos por proceso de doping. Si antes de ser reemitido térmicamente hacia la banda de conducción, el electrón atrapado se encuentra con un hueco (o electrón) que se mueve en el mismo estado energético, estos se recombinan.

### 3.5.5 Movimiento de portadores

Los portadores se mueven libremente sobre el enrejado del semiconductor con direcciones aleatorias, y velocidades determinadas por la masa del portador y su temperatura. La velocidad de libre movimiento de estos portadores (velocidad termal) es una velocidad promedio para el sistema, por lo cual algunos tendrán una velocidad más alta que otros y la velocidad de cada portador se mantendrá hasta que colisionen con otro.

### 3.5.6 Difusión

Cuando un haz luminoso incide en un material semiconductor, este genera portadores en la superficie, pero no en otros sectores alejados del material, con esto se genera un gradiente de concentración, esto induce un proceso de difusión de portadores, movimiento que se mantendrá hasta que la concentración sea uniforme en el material. Este desplazamiento masivo de portadores no excluye el movimiento individual de estos.

La velocidad a la que se efectúe la difusión dependerá de la velocidad de movimiento de los portadores (difusiones más rápidas ocurrirán a mayores temperaturas) y de la distancia entre eventos de colisiones en la red.

### 3.5.7 Transporte por Arrastre

En presencia de un campo eléctrico impuesto, el movimiento masivo de electrones se efectuará en dirección opuesta a este, debido a la carga de estos, y de forma acelerada, por lo mismo, el movimiento de huecos será orientado según el campo eléctrico. El movimiento de portadores bajo estas circunstancias es llamado “movilidad”, que varía para diferentes materiales semiconductores. El movimiento por corriente de arrastre (drift) no es propio de los materiales semiconductores, sino que también se presenta en metales.

## 3.6 Juntas PN

### 3.6.1 Formación de una Junta PN

Para la formación de juntas p-n se utilizan comúnmente materiales del grupo IV de la tabla periódica, también son usados en conjunto materiales de grupo III y V o de grupos II y VI, la mayoría de las celdas solares son en base a silicio.

Las juntas son creadas uniendo materiales semiconductores de tipo-p con materiales tipo-n. Ya que los materiales de tipo-n tiene una elevada concentración de electrones, contrario a los tipo-p, que presentan un alto número de huecos, se genera con esto un gradiente de concentración entre ambos materiales, o dicho de forma equivalente, movimiento por difusión. Es de esperarse que el flujo por difusión continúe hasta que se llegue a un equilibrio de concentraciones en ambos materiales, entre huecos y electrones, sin embargo, este no es el caso en las uniones p-n.

Cuando un portador trata de desplazarse hacia el otro lado de la junta, debe separarse de una carga opuesta que se encuentra fija en la red cristalina, incapaz de moverse, es decir, en el segmento de tipo-n se exponen iones positivos, contrario al segmento de tipo-p. La presencia de núcleos positivos y negativos generará un campo eléctrico y la zona donde se desarrolla este se conoce como “región de agotamiento”. El campo eléctrico será capaz de transportar rápidamente portadores libres, intentando mantener los huecos en el material de tipo-p y los electrones en el material de tipo-n, a menos que dichos portadores tengan suficiente energía para moverse de un material a otro.

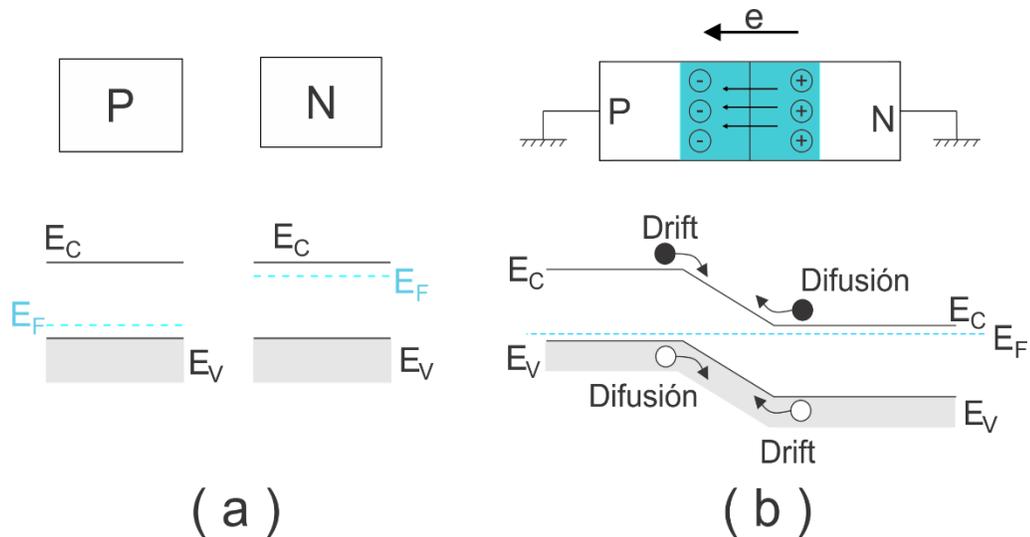


Figura 5: (a) Semiconductores dopados tipo-p y tipo-n previo a formar una junta. (b) Campo eléctrico en zona de agotamiento y diagrama de energía en una junta p-n bajo equilibrio termal. (Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.2 Diodos PN

Los diodos son parte fundamental en el funcionamiento de una amplia variedad de componentes electrónicos y en ellos se expresan todas las formas de transporte, generación y recombinación ya mencionadas.

En la condición de equilibrio el flujo neto de cargas en el dispositivo semiconductor es nulo, las corrientes de difusión y de arrastre logran contraponerse mutuamente de manera precisa, tanto para el caso de electrones, como de huecos.

### 3.6.3 Polarización en uniones PN

#### Polarización Directa

Se le llama polarización directa a la aplicación de una diferencia de voltaje en el dispositivo, utilizando un voltaje positivo en el extremo p y un voltaje negativo en el extremo n, lo cual disminuye el campo eléctrico formado por la unión p-n. El decaimiento en el campo creado por la unión p-n, altera el equilibrio en el material y favorece la difusión de portadores mayoritarios.

En esta situación ocurre la inyección de portadores minoritarios desde el borde de la región de agotamiento, los cuales se mueven alejándose de la unión debido a la difusión y recombinándose con portadores mayoritarios, donde los últimos pueden ser suministrados desde un circuito externo, generando una corriente neta que fluye bajo polarización directa.

Los portadores minoritarios inyectados al sistema, de la misma forma que los mayoritarios, se recombinan, por tanto, más portadores pueden difundirse a través de la unión. Con esto, la corriente que fluye bajo polarización directa, corresponde a la corriente de portadores que participarán en procesos de recombinación, por lo cual, a mayor tasa de sucesos de recombinación, se presentará un mayor flujo de cargas a través de la unión. El parámetro “corriente de oscuridad” ( $I_0$ ) es una medida de la recombinación en un dispositivo.

### Polarización Inversa

Bajo polarización inversa, el voltaje aplicado al dispositivo refuerza el campo eléctrico en la región de agotamiento, generando un fuerte descenso en las probabilidades de que un portador atraviese de un lado de la unión al otro. Lo anterior implica una disminución en la corriente de difusión, además de un leve aumento en la corriente de arrastre por el ensanchamiento de la región de agotamiento, siendo este último efecto de poca importancia en células solares conformadas por silicio.

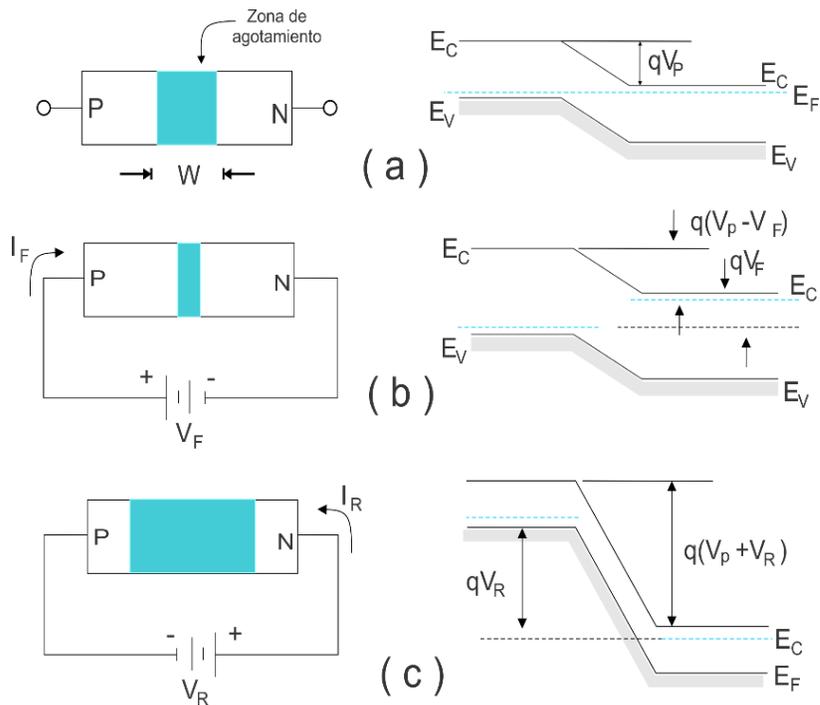


Figura 6: Esquema de la zona de agotamiento y diagramas de banda para distintos tipos de polarización sobre una junta p-n. (a) Condición de equilibrio termal. (b) Polarización directa. (c) Polarización inversa. (Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.4 Ecuación del Diodo Ideal

La ecuación del diodo busca entregar una expresión para el flujo de corriente a través de un diodo en función del voltaje al cual es sometido. La ecuación del diodo ideal se expresa como

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (3.5)$$

Donde

- $I$  : corriente que fluye a través del diodo
- $I_0$  : corriente de saturación oscura
- $V$  : voltaje aplicado entre las terminales del diodo
- $q$  : valor absoluto de la carga del electrón
- $k$  : constante de Boltzmann
- $T$  : temperatura absoluta (K)

Para los casos de diodos no ideales, se incorpora un factor de idealidad ( $n$ ), que puede tomar valores entre 1 y 2, convirtiendo la ecuación anterior en

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (3.6)$$

En los dispositivos reales, la corriente de saturación es fuertemente dependiente de la temperatura del dispositivo. Del mismo modo, los mecanismos que cambian el factor de idealidad también influyen en la corriente de saturación.

### 3.7 Celdas Solares

Las celdas fotovoltaicas corresponden a dispositivos electrónicos que permiten la conversión directa de la luz solar en energía eléctrica. Están compuestas de materiales semiconductores formando uniones de tipo p-n, junta en la cual se expone un lado de dopaje negativo (tipo-n) para recibir radiación y excitar sus electrones.

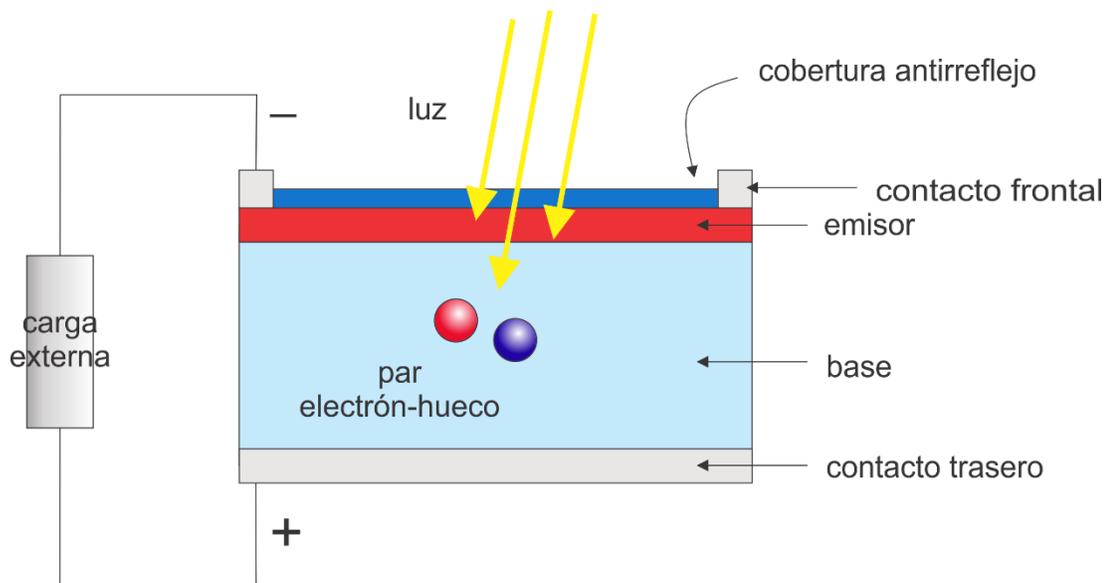


Figura 7: Esquema de una celda solar y sus componentes. (Fuente: Elaboración propia)

Se puede resumir el funcionamiento elemental de una celda solar en los siguientes pasos

- La luz incidente gatilla el proceso de generación en la celda, dando paso a la generación de pares electrón-hueco.
- Los portadores generados son separados por la acción del campo eléctrico producido por la junta p-n.
- Los portadores de cargas mayoritarios se mueven por el contacto frontal hacia el circuito externo o carga, liberando energía en forma de trabajo.
- Los portadores minoritarios (idealmente) cruzan la junta, acción inducida por el campo eléctrico, convirtiéndose en transportadores mayoritarios
- Si el sistema se encuentra en corto circuito (es decir, si los puntos de contacto se encuentran conectados), en el segmento de contacto trasero se unirán los portadores que han pasado por la carga externa y cruzado la junta p-n, recombinándose.

### 3.7.1 Probabilidad de Colección

Se refiere a la probabilidad de que un transportador generado por excitación luminosa contribuya a la corriente generadora de energía, es decir, que sea colectado por la junta p-n, lo cual dependerá de factores como la distancia que deba atravesar comparada con el largo de difusión, o de propiedades superficiales del dispositivo.

La probabilidad de colección de transportadores generados en la zona de agotamiento corresponde a la unidad, y disminuye a medida que se considera una distancia mayor a la superficie de unión de la junta.

### 3.7.2 Eficiencia cuántica

Corresponde al cociente entre los portadores colectados por la celda solar y la cantidad de fotones con determinada energía que inciden en la celda.

Se tendrá que la eficiencia corresponde a la unidad si todos los fotones de una determinada longitud de onda son absorbidos, y a su vez, todos los portadores minoritarios generados por esta absorción son colectados. Por otra parte, la eficiencia cuántica para fotones cuya energía sea menor al gap de banda, será de cero, pues no cuentan con energía suficiente para producir un par electrón-hueco.

### 3.7.3 Respuesta espectral

El concepto de respuesta espectral es parecido conceptualmente al de eficiencia cuántica. En este caso, el término corresponde a la razón entre la corriente generada por la celda solar, comparada con a la potencia incidente sobre esta, la cual dependerá de la longitud de onda del haz luminoso. Se presenta a continuación una curva de respuesta espectral.

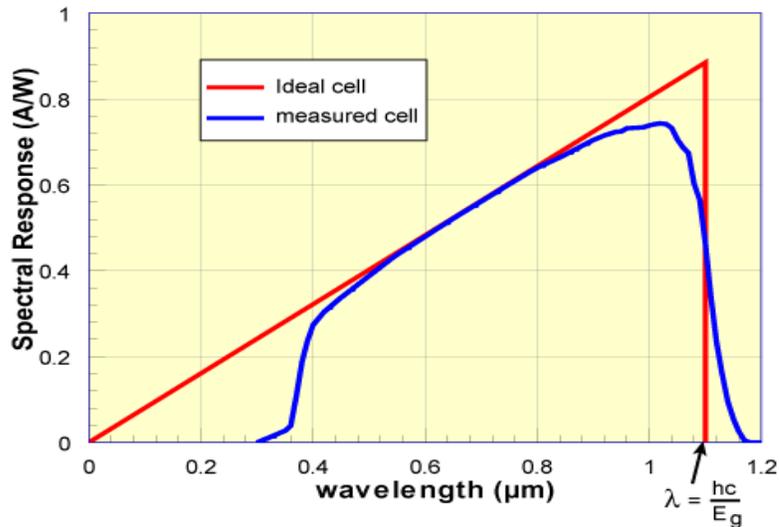


Figura 8: Respuesta espectral para una celda solar de silicio bajo vidrio [16].

Como se muestra en la figura 8, en longitudes de onda inferiores a 400 [nm] el cristal absorbe la mayor parte de la luz y la respuesta de la celda es muy baja. En longitudes de onda intermedias, la celda se acerca al comportamiento ideal.

La respuesta espectral de la celda solar se verá limitada por su capacidad de absorción, ya que el semiconductor no puede absorber fotones que le proporcionen menor energía que la del gap de banda, inhabilitándolo para absorber longitudes de onda elevadas. De la misma manera, si la longitud de onda es muy corta, el fotón tendrá energía superior al gap de banda, por lo que la energía residual no podrá ser aprovechada y se traducirá en el aumento de temperatura del sistema. Ambos efectos se expresan como pérdidas energéticas para la celda solar.

### 3.7.4 Efecto fotoeléctrico

El simple hecho de que haya generación de portadores y colección de estos por parte de la unión p-n, no basta para generar energía aprovechable, sino que es necesaria la existencia de una diferencia de potencial, dicho voltaje se crea debido al proceso de “efecto fotovoltaico”.

La colección de portadores provoca la acumulación de electrones en el sector de tipo-n y una concentración similar de huecos en el sector de tipo-p. Dada esta segregación de cargas, se produce un campo eléctrico opuesto al generado por la unión p-n, reduciendo el campo neto y aumentando la corriente de difusión de polarización directa. Se crea por tanto un nuevo equilibrio en el que existe una diferencia de potencial entre las distintas partes de la junta p-n, como resultado la corriente total producida por la célula vendrá dada por la diferencia entre la corriente generada por luz ( $I_L$ ), y la corriente de polarización directa. Si las dos corrientes mencionadas se encuentran en equilibrio, se tendrá una corriente total nula, la cual se da para una tensión llamada “voltaje de circuito abierto” ( $V_{oc}$ ).

### 3.7.5 Curva IV

La curva característica de una celda fotovoltaica, curva IV, se crea como la superposición de la curva IV de la celda en condiciones de oscuridad con la corriente generada por luz. El efecto lumínico corresponde a un desplazamiento de la curva IV del diodo, convirtiendo la ecuación del diodo (3.6) en la expresión

$$I = I_L - I_0 \left[ e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right] \quad (3.7)$$

El término  $-1$  de la ecuación puede ser despreciado ya que el factor exponencial es considerablemente más elevado para voltajes que se encuentren sobre 100 [mV], se tendrá que a bajos voltajes, el término  $I_L$  domina por sobre  $I_0$ , con esto, bajo condiciones de iluminación se tiene

$$I = I_L - I_0 \left[ e^{\frac{qV}{nkT}} \right] \quad (3.8)$$

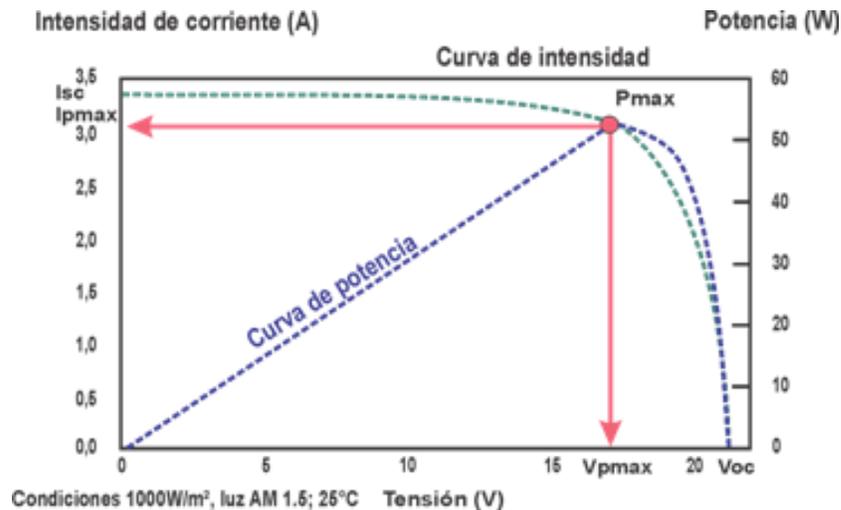


Figura 9: Curvas características, IV y potencia, de una celda solar [17].

### 3.7.6 Corriente de cortocircuito

Corresponde a la corriente que circula por la celda solar bajo condiciones de voltaje nulo (equivalente a un cortocircuito), por lo general denotada por  $I_{sc}$ . En la curva IV representa el corte con la ordenada, como se muestra en la figura 9.

El término  $I_{sc}$  se debe a la generación y colección de portadores producto del efecto lumínico. De ser idealizada la celda, se tendrá equivalencia entre las corrientes  $I_L$  e  $I_{sc}$ , siendo este último término la máxima corriente extraíble de la célula solar.

Factores que determinan la corriente de cortocircuito son

- Área de la célula fotovoltaica
- Potencia de la fuente lumínica
- Espectro de la fuente lumínica
- Propiedades ópticas de la celda (absorción y reflexión)
- Probabilidad de colección

En general se presenta que para condiciones de cortocircuito es posible medir externamente  $I_{sc}$ , siendo este equivalente con  $I_L$  y de uso indistinto, a menos que se presenten resistencias en serie muy elevadas (superiores a  $10 [\Omega/cm^2]$ ), donde se tendría un  $I_{sc}$  inferior a  $I_L$ .

### 3.7.7 Voltaje de circuito abierto

El voltaje de circuito abierto,  $V_{oc}$ , corresponde al máximo voltaje disponible en una celda solar y se da para condiciones de corriente total nula. Dicho voltaje viene dado por la polarización directa de la junta p-n bajo condiciones de generación por excitación lumínica y representa el corte con el eje de las abscisas en la curva característica de la celda, como se muestra en la figura 9.

Al imponer una corriente neta nula, es posible despejar la expresión para el voltaje de circuito abierto como

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (3.9)$$

Lo cual muestra su dependencia con la corriente de saturación de la junta p-n y la generada por luz incidente.

Las celdas de silicio monocristalino de alta calidad presentan valores de  $V_{oc}$  por sobre los  $730 [mV]$  bajo un espectro de AM1.5 [18], mientras los dispositivos policristalinos comerciales rondan un  $V_{oc}$  de  $600 [mV]$ . El factor  $kT/q$  presente en la ecuación, es llamado comúnmente voltaje térmico.

### 3.7.8 Factor de llenado

Se han presentado los parámetros de máximo voltaje ( $V_{oc}$ ) y máximo flujo de corriente ( $I_{sc}$ ), en cuyos puntos de operación se tiene una potencia generada (área bajo la curva IV), nula. El factor de llenado, o FF, es un parámetro que indica el punto de operación sobre la curva IV donde es posible extraer la máxima potencia disponible de la celda, potencia indicada por el rectángulo que maximiza su área bajo la curva característica del panel, es decir, cumple con la relación

$$\frac{d(V \cdot I)}{dV} = 0$$

Expuesto lo anterior, se puede expresar el voltaje de máxima potencia como

$$V_{mp} = V_{oc} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{V_{mp}}{nkT/q} + 1\right) \quad (3.8)$$

La forma de determinar la expresión del FF a partir de la curva IV corresponderá a

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (3.9)$$

### 3.7.9 Eficiencia Solar

Se utiliza comúnmente la eficiencia como parámetro de comparación del desempeño entre distintas celdas solares y se define como el cociente entre la energía suministrada por el panel y la energía que incide en él por concepto de radiación luminosa, donde esta última depende de la temperatura de la celda, intensidad y espectro de la fuente. La eficiencia de celdas solares utilizadas a nivel de superficie terrestre se calcula bajo condiciones de 25°C y espectro AM1.5. La expresión para la eficiencia de la celda se define como

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{G \cdot A_p} \quad (3.10)$$

Donde

- $V_{oc}$  : voltaje de circuito abierto
- $I_{sc}$  : corriente de cortocircuito
- $FF$  : factor de llenado
- $\eta$  : eficiencia del panel
- $G$  : flujo radiativo hacia el panel,  $1[kW/m^2]$  en cálculos estándar de eficiencia
- $A_p$  : área del panel fotovoltaico

### 3.7.10 Efecto de la intensidad Luminosa

Alteraciones en la intensidad luminosa que incide en una celda solar, cambian todos los parámetros de la misma, incluyendo la corriente de corto circuito, factor de llenado, voltaje de circuito abierto y eficiencia. La intensidad luminosa es llamada número de soles y se utiliza como unidad la iluminación estándar de 1 [ $kW/m^2$ ] bajo un espectro AM1.5.

Si la intensidad de la luz incidente decrece, también lo hará la polarización presente en el dispositivo y la intensidad de corriente que transite en él, es decir, ante interferencias en la radiación recepcionada por el panel fotovoltaico, como en el caso de la radiación difusa al atravesar un medio con partículas en suspensión, la curva IV se verá afectada disminuyendo el área bajo esta y desplazando sus puntos extremos.

## 4 Montaje Experimental

El proyecto consiste en la medición del impacto de la nubosidad controlada en la recepción del panel fotovoltaico, nubosidad que representará la composición simplificada de nubes cálidas. Para esto se utilizan los siguientes elementos

### 4.1 Componentes

#### Panel fotovoltaico



Número de celdas	24
Temperatura de operación [°C]:	-20 ~ +60
Dimensiones [mm]:	60 x 85 x 3
Cubierta trasera:	Epóxica
Potencia máxima ( $P_{max}$ ):	0,5 [W]
Voltaje de potencia máxima ( $V_{mp}$ ):	12 [V]
Corriente de potencia máxima ( $I_{mp}$ ):	45 [mA]
Voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ):	13,5 [V]
Corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ):	0,054 [A]

*Figura 10: Panel fotovoltaico.*

#### Fuente lumínica

LED de 1500 lúmenes y consumo de 18 [W], opera a un espectro de temperatura 5500K aproximadamente, su pantalla cuadrada posee dimensiones de 18 [cm] x 18[cm] y un ángulo de iluminación de 150°.



*Figura 11: Foco Led Plafón*

## Humidificadores

Se utilizan humidificadores Mini Mist y WETY MH-5.2-AGRO, que atomizan agua por ultrasonido, los caudales máximos son de 150 [ml/hr] y 310 [ml/hr] respectivamente. Los humidificadores generan gotas de diámetros entre 3 a 5 [ $\mu\text{m}$ ] a partir de agua desmineralizada.



Figura 13: Humidificador Mini Mist



Figura 14: Humidificador WETY

## Recipiente

Contenedor fabricado para la nubosidad a generar, cuenta con 4 compartimientos contiguos, cada uno de ellos con un espesor de 4 [cm], permitiendo trabajar con dimensiones controladas y bien definidas. Está hecho a partir de vidrio transparente y consta de una estructura principal y su tapa, la cual permite el ingreso de la nubosidad a los compartimientos y su posterior salida. El plano generado en software Solid Edge V20 se puede encontrar en Anexo A.

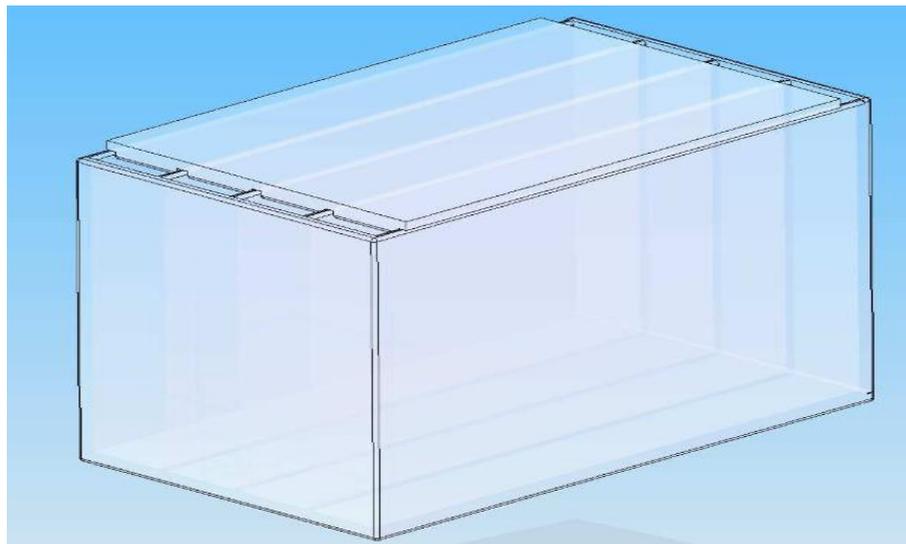


Figura 15: Recipiente.

## Medidor amperímetro/voltímetro YB27VA



Medición de voltaje:	DC 0 ~ 100V
Resolución mínima (V):	0.1V
Medición de corriente:	2A (Medición directa, derivación integrada)
Resolución mínima (A):	0.01 A
Tasa de refresco:	~ 500 mS / times
Precisión de medición:	1% ( $\pm 1$ )

Figura 16: Medidor amperímetro/voltímetro YB27VA

Potenciómetros lineales de 500 [k $\Omega$ ].



Figura 17: Potenciómetro B500K

## 4.2 Montaje

El foco representará la fuente de luz que alimenta el panel fotovoltaico, mientras que el recipiente contendrá la nube artificial controlada, posicionada entre el foco y la celda. El diagrama eléctrico se puede apreciar en la figura 17.

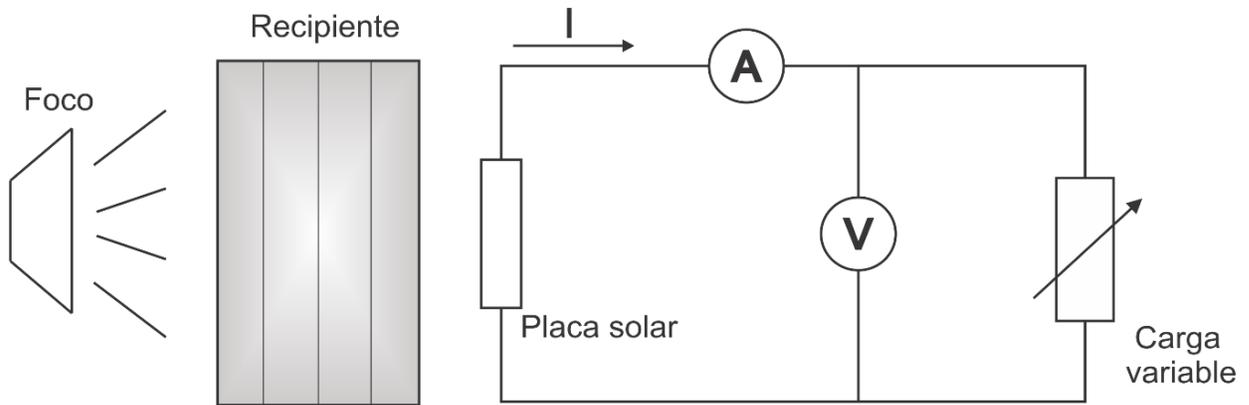


Figura 18: Esquema eléctrico del montaje.

En el montaje real, existe una distancia de 60 cm entre la fuente de luz y la placa solar, el recipiente contenedor se encuentra inmediatamente frente a la celda, a una distancia no mayor a medio centímetro. Los potenciómetros son montados con una disposición en serie sobre una protoboard, que junto a la celda y medidor amperímetro/voltímetro son fijados a una estructura hecha de madera, asegurando que la celda solar se encuentre paralela a la fuente de luz, como se muestra en la figura 18.

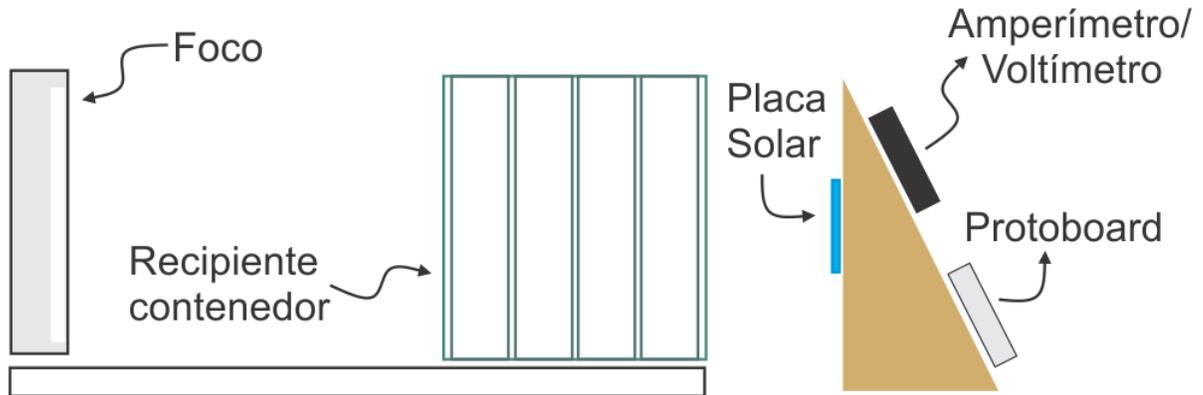


Figura 19: Esquema lateral del montaje.

La nubosidad se recrea por medio de la atomización de agua líquida, que circula por los compartimientos del recipiente. El hecho de trabajar con agua desmineralizada y pulverizada por medio de humidificadores ultrasónicos, permite eliminar como variables del montaje la energía requerida para la creación de la nubosidad y el efecto de núcleos de condensación presente en las gotas de agua. Para analizar los efectos de los componentes del sistema sobre la recepción de la radiación, se debe estudiar individualmente la curva característica de la celda fotovoltaica sometida a la interferencia de cada uno, por lo cual se mide en casos de recepción directa, en presencia únicamente del recipiente y para distintas configuraciones de la nube.

### 4.3 Mediciones

Las mediciones se realizan de acuerdo a la siguiente metodología

Todas las mediciones se realizaron en horarios entre las 00:00 am a 5:00 am donde el componente de panel led representa la única fuente de luz. Esto con la finalidad de minimizar la posible presencia de luz, ya sea solar o de otra fuente, además de disminuir las fluctuaciones en el sistema eléctrico que pueden afectar a la producción de luz por parte del panel led.

- A. Se verifica que los componentes celda solar, fuente lumínica y recipiente, carezcan de acumulaciones de polvo, manchas o humedad.

- B. Se cubre la superficie entre la fuente y el panel fotovoltaico con un material negro opaco, que minimice la luz que puede recepcionar la celda solar por rebote con la superficie. Se optó por la aplicación de pintura negra sobre la superficie, que permite una absorción del 94% en la radiación [19].
- C. Se disponen los equipos como se indica en la figura 18.
- D. Se enciende la fuente lumínica por un tiempo de 10 minutos previo a la toma de datos.
- E. En el caso de mediciones en caso de nubosidad se enciende 10 minutos previo a la toma de datos, bajo un caudal de 150 [ml/hr], se debe verificar que no existan fugas entre compartimientos.
- F. Se elige una configuración para la carga variable y se mantiene por un intervalo de 5 minutos, luego de esto, se miden durante 5 minutos los valores entregados para el voltaje y la intensidad de corriente.
- G. Se varía la resistencia de la carga y se repite el punto F.
- H. Las mediciones no se realizan consecutivamente por un intervalo mayor a una hora. Para continuar la medición luego de este lapso, se itera desde el punto A nuevamente.

Para la medición del punto de operación  $I_{sc}$  se sigue la metodología expuesta anteriormente, pero bajo la configuración mostrada en la figura 19.

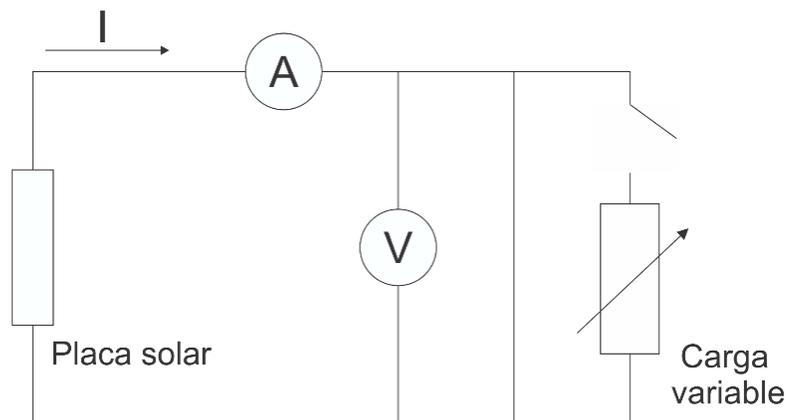


Figura 20: Configuración del circuito eléctrico, caso  $I_{sc}$ .

Para la medición del punto de operación  $V_{oc}$  se sigue la metodología expuesta anteriormente, pero bajo la configuración mostrada en la figura 20.

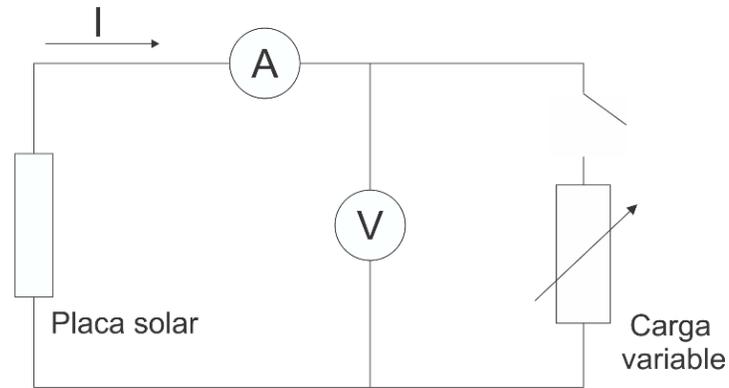


Figura 21: Configuración del circuito eléctrico, caso Voc

## 4.4 Análisis del montaje

### 4.4.1 Radiación percibida por la celda en recepción directa

La porción de radiación que incide en el área correspondiente a la celda solar puede ser calculada sabiendo que el ángulo de iluminación es de  $150^\circ$  y la distancia entre la fuente lumínica y el panel receptor es de 60 [cm].

Se asumirá que los  $150^\circ$  de apertura son simétricos, utilizando un sistema de coordenadas esférico, se dará tanto para la componente cenital como azimutal, esta disposición se muestra en la figura 21, donde la placa y el panel se encuentran paralelos.

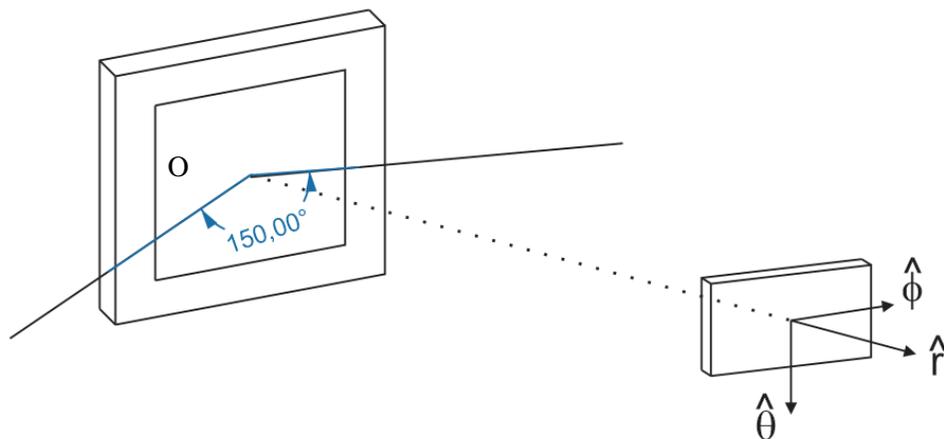


Figura 22: Disposición de la celda solar frente al panel led.

Es necesario notar que el origen del sistema de referencia se debe encontrar a una distancia de 2,411 [cm] tras el centro geométrico de la fuente para cumplir con el ángulo de apertura, como se muestra en la figura 22.

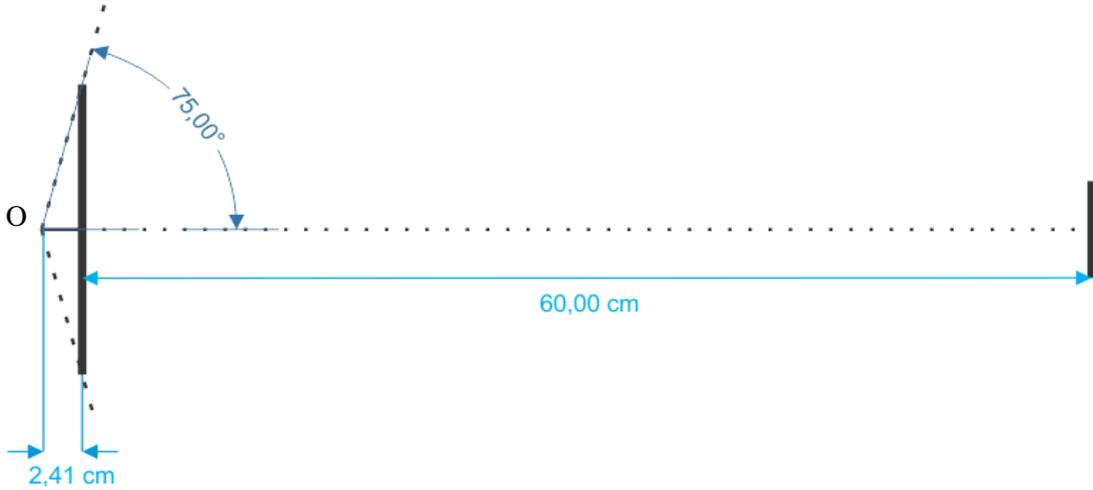


Figura 23: Disposición de la celda solar frente al panel led, vista superior.

Para el cálculo del área total irradiada se debe considerar, en coordenadas esféricas

$$r = 0,62411, \quad \phi \in \left[-\frac{5\pi}{12}, \frac{5\pi}{12}\right], \quad \theta \in \left[\frac{\pi}{12}, \frac{11\pi}{12}\right]$$

El área total irradiada a 0,60 m de la fuente correspondería a

$$A_t = \iint dA = \int_{-\frac{5\pi}{12}}^{\frac{5\pi}{12}} \int_{\frac{\pi}{12}}^{\frac{11\pi}{12}} r^2 \sin \theta \, d\theta d\phi = 0,62411^2 \cdot \frac{5\pi}{6} \cdot \frac{1 + \sqrt{3}}{\sqrt{2}} \approx 1,97 \, m^2$$

El área proyectada sobre el panel solar se puede calcular de igual forma considerando

$$r = 0,62411 \, m$$

$$\phi \in \left[-\tan^{-1}\left(\frac{4,25}{0,62411}\right), \tan^{-1}\left(\frac{4,25}{0,62411}\right)\right]$$

$$\theta \in \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{3}{0,62411}\right), \frac{\pi}{2} + \tan^{-1}\left(\frac{3}{0,62411}\right)\right]$$

Ya que los ángulos a trabajar son pequeños y el radio es considerablemente mayor que las dimensiones de la placa, podemos aproximar la proyección de la placa por su área,  $A_p$ , donde

$$A_p = 0,085 \cdot 0,06 = 0,0051 \text{ m}^2$$

Dado esto, la porción de radiación que incide en la placa solar con respecto a la producida por la fuente es

$$f_{in} = \frac{A_p}{A_T} = \frac{0,0051}{1,97} = 0,00258$$

La tecnología led que genera una fuente luminosa de 5500K sigue una distribución espectral como la mostrada en la figura 23.

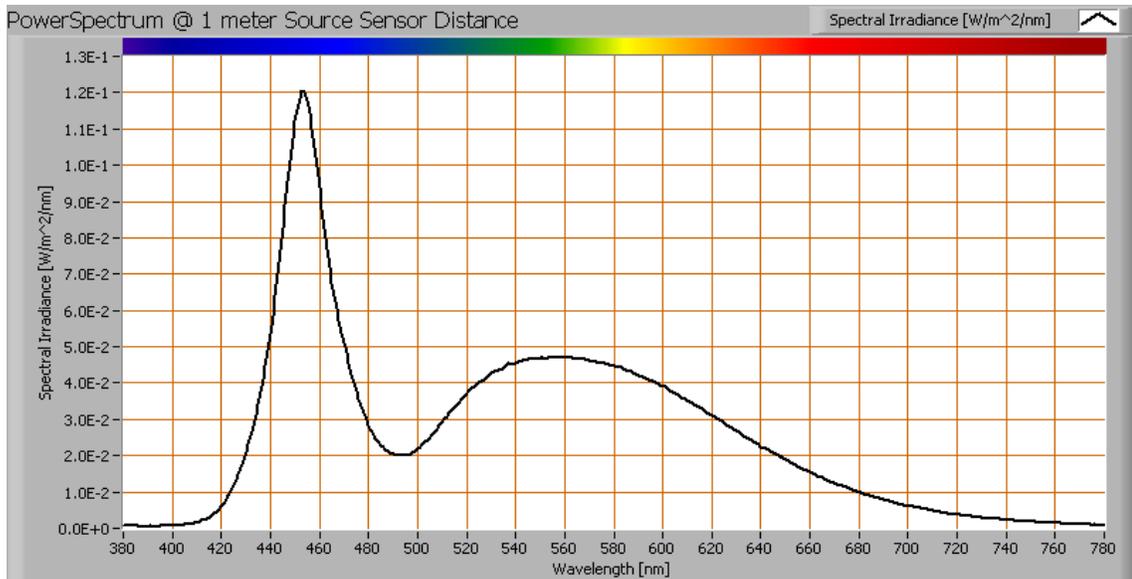


Figura 24: Distribución espectral, led 5500K [20].

Los paneles led cuentan con un factor de potencia que toma valores típicamente entre 0,9 y 0,99 [20]. Para el análisis se considera un factor de 0,95

$$P_{ed} = 18 \text{ W} \cdot 0,95 = 17,1 \text{ W}$$

La producción de luz blanca utilizando tecnología led, ocurre mediante un recubrimiento de fósforo amarillo sobre bulbos led color azul. Los fotones azules o UV generados en el led viajan a través de la capa de fósforo sin alteración, o se convierten en fotones amarillos en la capa de fósforo. Las combinaciones de los fotones azules y amarillos se combinan para generar luz blanca [21]. Es por esto que la eficiencia de conversión de energía eléctrica a lumínica para la fuente,

viene dada por la eficiencia típica de un led azul, o  $\eta_{BL} = 0,35$  [22]. Con esto, la potencia lumínica generada por la fuente corresponde a

$$P_{LF} = 18[W] \cdot 0,95 \cdot 0,35 = 5,985 [W]$$

Pero de esta potencia emitida por la fuente, solo una pequeña porción impactaría sobre la celda fotovoltaica siendo la potencia incidente sobre la celda solar

$$P_{in} = P_{LF} \cdot f_{in} = 0,0154 [W]$$

Se considera que esta potencia incidente se distribuirá uniformemente en el área bajo la curva del espectro, se utiliza una aproximación de la curva, expuesta en la figura 24, a la que llamaremos  $F(\lambda)$ . El área bajo la curva del espectro ( $A_e$ ) puede ser calculada de forma numérica utilizando la regla del punto medio.

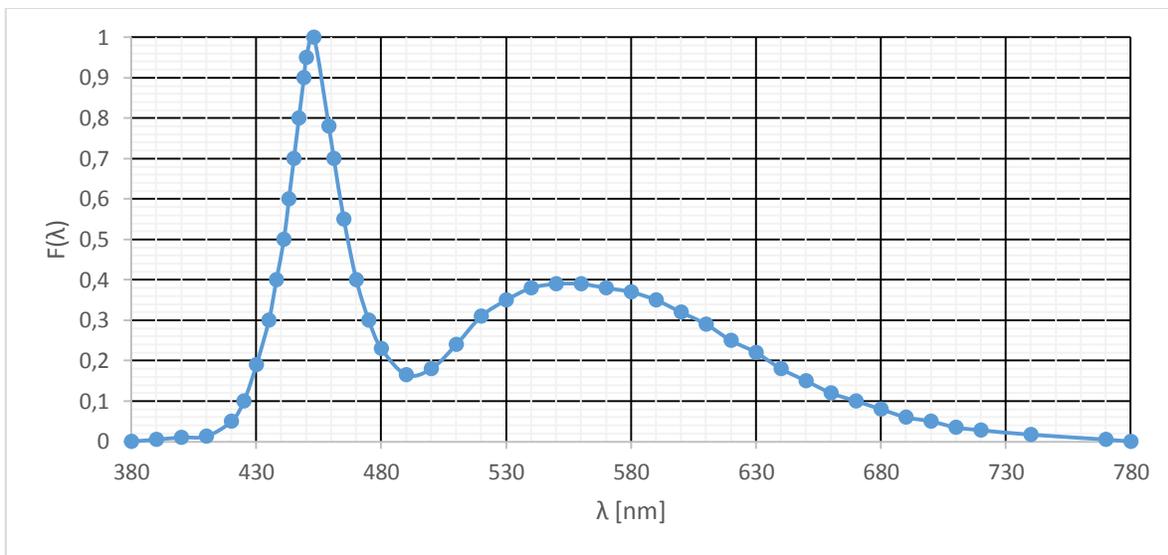


Figura 25: Aproximación de la distribución espectral para 5500K, utilizada para integración numérica.

$$A_e = \int_{380}^{780} F(\lambda) d\lambda \approx \sum (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \cdot F\left(\frac{\lambda_{i+1} + \lambda_i}{2}\right) = 85,17 \text{ nm}$$

Con esto tendremos una densidad de

$$\rho = \frac{P_{in}}{A_e} = \frac{0,0154 \text{ W}}{85,17 \text{ nm}} = 0,0001819 \left[ \frac{W}{nm} \right]$$

Además, es posible aproximar la respuesta espectral para una celda ideal como se muestra en la figura 8, al utilizar una función

$$R(\lambda) = 0,0008 \cdot \lambda \left[ \frac{A}{W} \right]$$

Donde  $\lambda$  mide en  $nm$

Con esto la intensidad de corriente que puede generar el panel solar, de absorber toda la radiación emitida sobre él, se obtendrá integrando, sobre todas las longitudes de onda, la expresión

$$I = \int \rho \cdot F(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda$$

Se obtiene nuevamente integrando numéricamente, según regla del punto medio, para el espacio de interés

$$I \approx \sum \rho \cdot F\left(\frac{\lambda_{i+i} + \lambda_i}{2}\right) \cdot R\left(\frac{\lambda_{i+i} + \lambda_i}{2}\right) \cdot (\lambda_{i+i} - \lambda_i) = 0,006625 [A]$$

Dados los datos de placa del panel, es posible calcular su eficiencia sabiendo que la potencia máxima producida se considera bajo condiciones de medición estándar, con radiación incidente  $G = 1 \text{ kW}/m^2$  y temperatura de la placa  $25^\circ C$ .

$$\eta_p = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{G \cdot A_p} = \frac{12V \cdot 45 \cdot 10^{-3} A}{1000 \frac{W}{m^2} \cdot 0,0051 m^2} = 0,1005 = 10,05\%$$

Asumiendo una eficiencia del 10,05% de la celda y un área de  $51 \text{ cm}^2$ , la generación de corriente máxima del panel fotovoltaico correspondería a

$$I_{pmax} = I \cdot \frac{\eta_p}{A_p} = I \cdot \frac{0,1005}{51} = 13,05 [\mu A/cm^2]$$

Cabe destacar que se realizaron fuertes suposiciones para este cálculo. En lo que respecta a la eficiencia de la celda, esta se asume igual a la medida bajo condiciones estándar, en un caso real, la eficiencia disminuye según sea menor la potencia incidente. La respuesta espectral se asumió comparándola con la curva del diodo ideal, en la práctica, debería darse una menor respuesta del panel. La distribución lumínica del emisor de luz se asumió homogénea en el espacio, además de ser orientada desde el centro geométrico del panel.

Por todas las consideraciones hechas, se espera que las magnitudes medidas de intensidad de corriente disponible para el panel sean menores a las calculadas de manera teórica, sin embargo, las mediciones deberían mantenerse en el orden de los  $\mu A/cm^2$ .

#### 4.4.2 Recepción a través del vidrio

La radiación incidente se verá enfrentada a 5 resistencias, representada por las caras de los compartimientos del recipiente contenedor, a lo largo de su trayectoria.

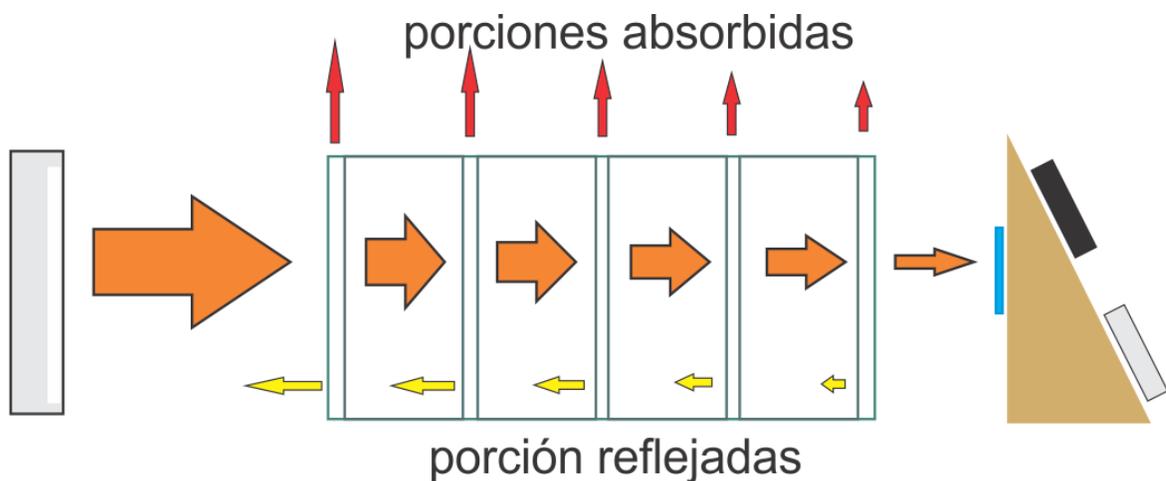


Figura 26: Esquema de radiación incidente sobre el panel fotovoltaico y su interacción con el recipiente contenedor

Cada cara reflejará y absorberá cantidades proporcionales a la radiación incidente según coeficientes que llamaremos  $r_m$  y  $a_m$  con esto la radiación que logra atravesar cada cara resulta

$$R' = R - r_m R - a_m R = R(1 - (r_m + a_m)) \quad (4.1)$$

El cristal común absorbe una débil proporción de la radiación solar (5 a 6 %) y refleja o transmite el resto. La magnitud reflejada y transmitida depende del ángulo de incidencia (ángulo formado por la normal al cristal con la dirección de los rayos del sol). Para pequeños ángulos de incidencia se transmite aproximadamente una porción superior al 85 % con respecto a la inicial y cerca de un 8-9% es reflejado.

Con esto  $R'/R \sim 0,85$  o superior dependiendo del espesor del vidrio, si el haz luminoso incide perpendicular al plano de este. En tal caso la proporción que incide en el panel luego de interactuar con las cinco placas de vidrio vendrá representada por

$$R' = R(1 - (r_m + a_m))^5 \quad (4.2)$$

#### 4.4.3 Recepción a través de la nubosidad

La radiación incidente se verá enfrentada en esta ocasión a las resistencias generadas por las caras del compartimiento y la nubosidad presente a lo largo de su trayectoria, como se muestra en la figura 26.

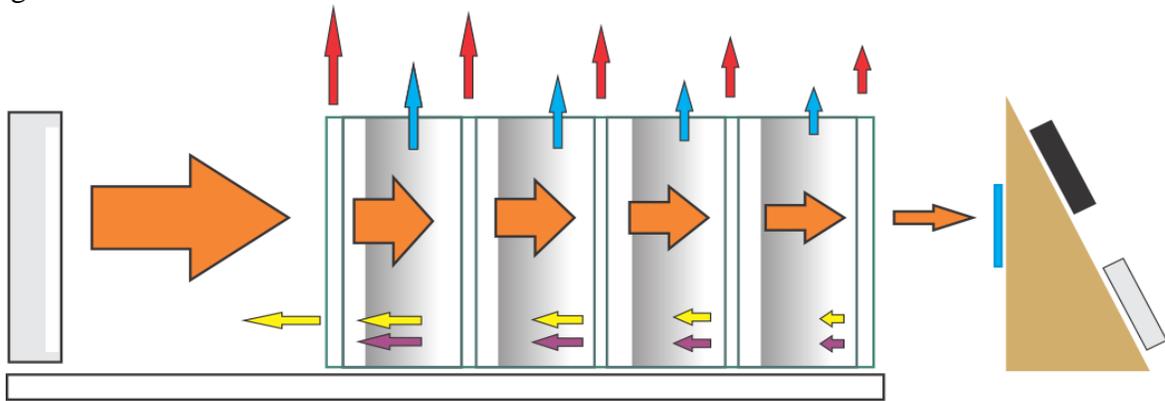


Figura 27: Esquema de radiación incidente sobre el panel fotovoltaico y su interacción con el recipiente contenedor y la nubosidad.

Se repite el mismo análisis incorporando los coeficientes de absorción y reflexión de la nubosidad que llamaremos  $r_c$  y  $a_c$ , con esto la radiación que logra atravesar cada nubosidad en el contenedor resulta

$$R' = R - r_c R - a_c R = R(1 - (r_c + a_c)) \quad (4.3)$$

En tal caso la proporción que incide en el panel luego de interactuar con las cinco placas de vidrio y una cantidad  $i$  de nubosidades presentes vendrá representada por

$$R' = R(1 - (r_m + a_m))^5 \cdot (1 - (r_c + a_c))^i \quad (4.4)$$

Con  $i = 1, 2, 3, 4$ , dependiendo del caso evaluado

Cabe notar que para el análisis realizado se despreció la interacción con la masa de aire presente debido a que el panel se encuentra a una distancia próxima al foco emisor. Es necesario

destacar que la porción de radiación incidente según este análisis no depende de la posición de los compartimientos utilizados como contenedores de nubosidad, sino que depende exclusivamente del número de compartimientos utilizados.

#### 4.4.4 Regresión Lineal

Los datos medidos en cada uno de los casos corresponden a voltaje e intensidad de corriente que indican puntos de operación de la celda en su curva característica IV, donde la tendencia de los puntos debería seguir la ecuación del diodo ideal. Es posible identificar el punto de operación  $I_{sc}$  imponiendo que el voltaje sea nulo, así se utiliza la ecuación 3.7, dentro del rango de validez de voltajes menores a 100 [mV] y el punto de operación cumple

$$I(V = 0) = I_{sc} = I_L$$

El resto de los valores medidos son pares ordenados de voltajes mayores a 100 [mV], por tanto, es aceptada la aproximación a la ecuación 3.8, donde conociendo el valor de  $I_L$  es posible linealizar el comportamiento de la función como

$$\ln[I_L - I(V)] = \ln(I_0) + \frac{q}{nkT} V$$

Un análisis de curva de tendencia permite encontrar ajustes para los valores de  $I_0$  y  $q/nkT$ .

## 5 Resultados

En base a lo expuesto en las secciones anteriores, se ha construido una base de datos con mediciones de respuesta en la celda ante la radiación percibida, ver Anexo B. Esta base de datos permite describir las curvas características de la celda para distintas configuraciones, donde los casos varían según los medios que interfieran en la recepción de radiación. Para cada caso se presenta su curva característica IV, de potencia, principales datos medidos y de su regresión asociada.

Todas las mediciones se efectuaron en un rango de temperatura de la placa que varía entre  $16^{\circ}\text{C}$  y  $17,5^{\circ}\text{C}$ .

Las mediciones de temperatura se realizaron con un multímetro digital UNI-T serie UT33, con una precisión de  $\pm 1\% + 3$ .

Las mediciones de voltaje en la celda fueron realizadas utilizando el medidor voltímetro/amperímetro YB27VA, con una precisión de  $\pm 1\% + 1$ .

Las mediciones de intensidad de corriente se realizaron utilizando un multímetro digital UNI-T serie UT33, con una precisión de  $\pm 1\% + 2$ .

### 5.1 Caso 1: Recepción directa

Sin presencia de nubosidad o recipiente contenedor, las curvas IV y de potencia para la celda fotovoltaica quedan representadas por las figuras 27 y 28.

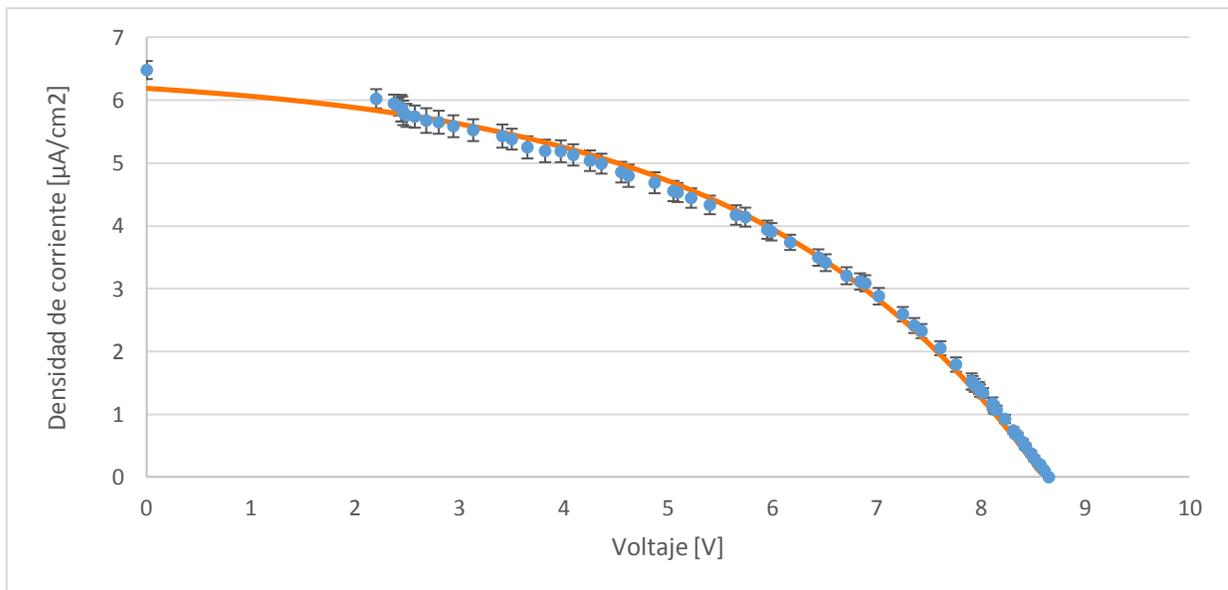


Figura 28: Caso 1, curva característica IV de la celda fotovoltaica para recepción directa.

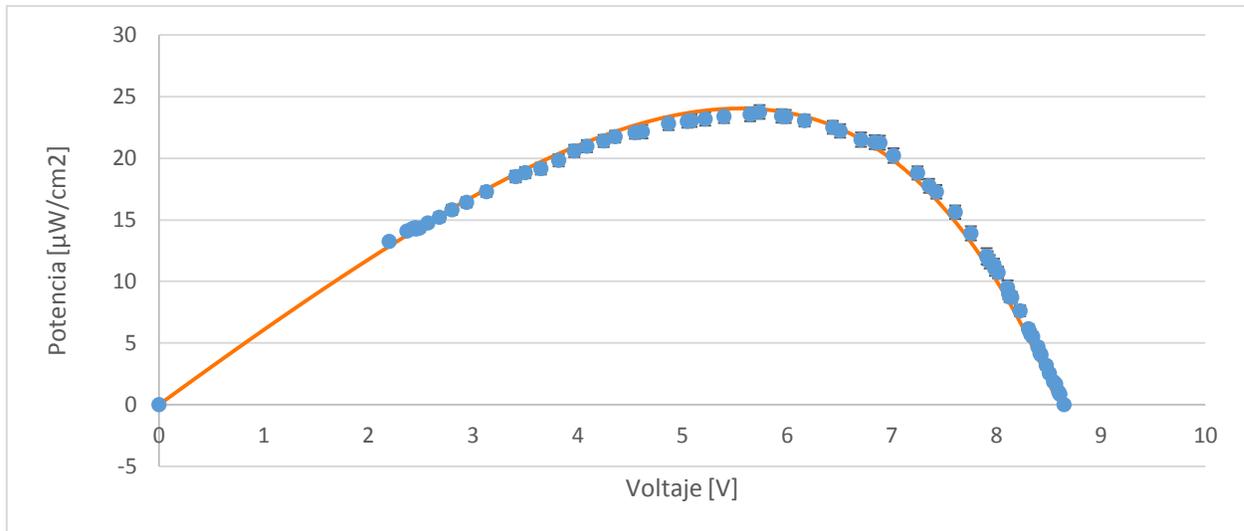


Figura 29: Caso 1, curva de potencia de la celda fotovoltaica para recepción directa.

Tabla 1: Resumen de mediciones, Caso 1

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente Corto Circuito	$I_{sc}$	6,48	$[\mu A/cm^2]$
Voltaje de Circuito Abierto	$V_{oc}$	8,65	$[V]$
Voltaje nominal	$V_{mp}$	5,74	$[V]$
Corriente nominal	$I_{mp}$	4,14	$[\mu A/cm^2]$
Potencia Máxima	$P_{max}$	23,76	$[\mu W/cm^2]$
Temperatura de Celda	$T_{panel}$	16,5	$[C]$
Factor de llenado	$FF$	0,48	

Tabla 2: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 1

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente de saturación oscura	$I_0$	0,29	$[\mu A/cm^2]$
Pendiente	$q/mk_bT$	0,361	$[V^{-1}]$
Coeficiente de determinación	$R^2$	0,991	

## 5.2 Caso 2: Recepción a través del recipiente

Cuando se sitúa únicamente el recipiente contenedor entre el foco y la celda solar, la curva característica queda representada IV por la figura 29, donde se aprecia el efecto de apantallamiento, por parte del recipiente, en la disminución del área bajo la curva y desplazamiento hacia el origen de los extremos de la curva, de igual forma la curva de potencia ve disminuido su máximo.

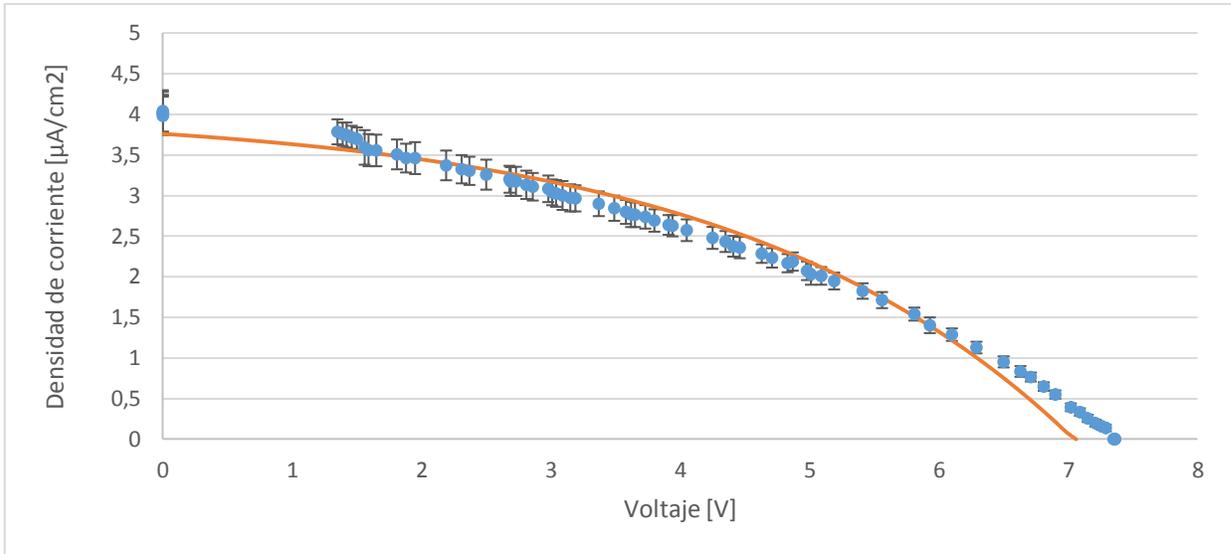


Figura 30: Caso 2, curva característica IV del panel fotovoltaico, al recepcionar luz a través del recipiente vacío.

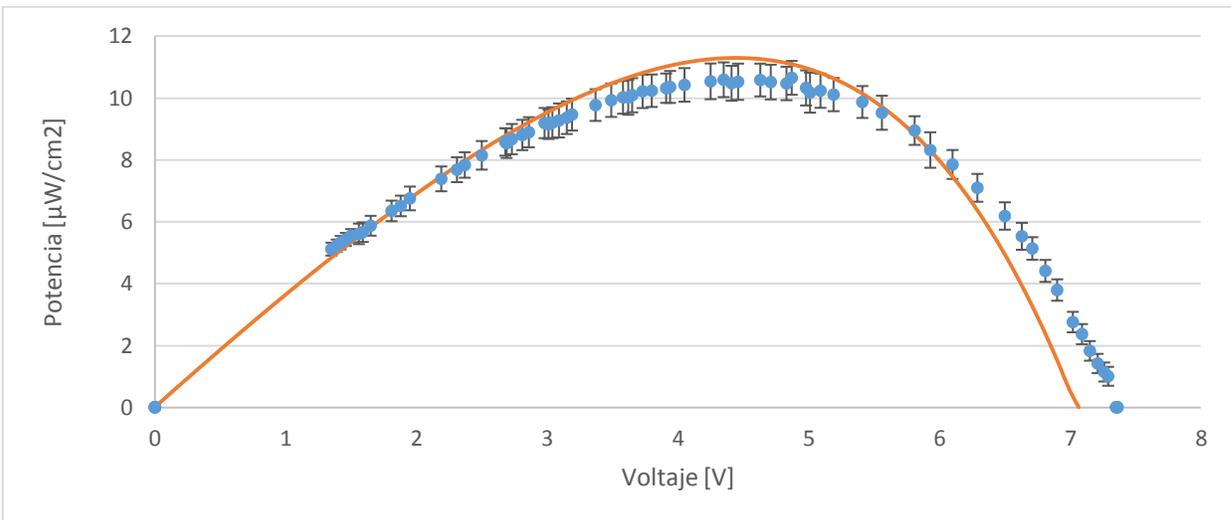


Figura 31: Caso 2, curva de potencia del panel fotovoltaico, al recepcionar luz a través del recipiente vacío.

Tabla 3: Resumen de mediciones, Caso 2

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente Corto Circuito	$I_{sc}$	4,04	$[\mu A/cm^2]$
Voltaje de Circuito Abierto	$V_{oc}$	7,36	[V]
Voltaje nominal	$V_{mp}$	4,87	[V]
Corriente nominal	$I_{mp}$	2,19	$[\mu A/cm^2]$
Potencia Máxima	$P_{max}$	10,65	$[\mu W/cm^2]$
Temperatura de Celda	$T_{panel}$	16	[C]
Factor de Llenado	$FF$	0,297	

Tabla 4: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 2

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente de saturación oscura	$I_0$	0,275	$[\mu A/cm^2]$
Pendiente	$q/mk_bT$	0,381	$[V^{-1}]$
Coefficiente de determinación	$R^2$	0,954	

### 5.3 Caso 3: Interferencia nubosa

Corresponde al caso de incorporación de la nubosidad generada al recipiente, se llevaron a cabo mediciones en siete configuraciones diferentes.

Por simplicidad se utilizará la notación 3.abcd para cada uno de los casos de interferencia nubosa, donde a, b, c y d pueden tomar valores 0 o 1 según el compartimiento indicado en la figura 31 se encuentre vacío o cubierto por nubosidad.

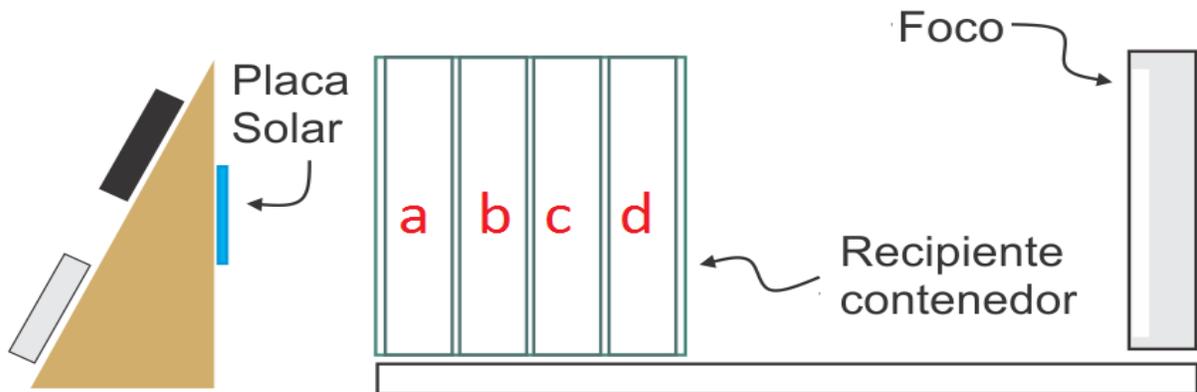


Figura 32: Relación entre notación de caso 3 y forma de la nubosidad.

Si, por ejemplo, solo el compartimiento “c” presenta nubosidad, el caso correspondería a la notación 3.0010, de forma similar, el caso 3.1100 correspondería a la utilización de los dos compartimientos más próximos a la placa solar, “a” y “b”.

Con el fin de variar únicamente el espesor de la nube y no la densidad de esta, se opera en régimen estacionario, para un estado de equilibrio entre el flujo másico producido por los humidificadores, que ingresa llenando completamente los compartimientos, y el que sale.

Las dimensiones de cada compartimiento (Anexo A), permiten encontrar el volumen de estos, además es posible calcular el tiempo que les toma ser llenado por el agua pulverizada, esto, junto con el caudal de los humidificadores proporcionado por el fabricante, permite calcular la densidad de la nubosidad generada. Para estos cálculos se considera la densidad del agua a la

temperatura de salida del humidificador, 17°C. Un resumen de los valores mencionados se puede encontrar en la tabla 5.

Tabla 5: Resumen de valores calculados para determinar la densidad de la nube en estado estacionario.

Parámetro	Valor	Unidades
Volumen de compartimiento	0,00234	[m <sup>3</sup> ]
Caudal volumétrico	0,0015	[m <sup>3</sup> /hr]
Densidad del agua	998,6	[kg/m <sup>3</sup> ]
Tiempo de llenado promedio	40,09	[s]
Masa de llenado para compartimiento	0,00165	[kg]
Densidad de la nubosidad	0,7063	[kg/m <sup>3</sup> ]

Cabe recalcar que el flujo de nubosidad generará que con el tiempo algunas gotas se depositen en las caras internas de los compartimientos, lo cual producirá un efecto de apantallamiento que variarán en el tiempo de acuerdo al tamaño de las gotas. Con el fin de determinar el impacto de la deposición de gotas en el tiempo, se toman mediciones en distintos puntos de operación en la celda y se compara la evolución temporal de sus valores medidos a lo largo del tiempo con respecto a su valor inicial.

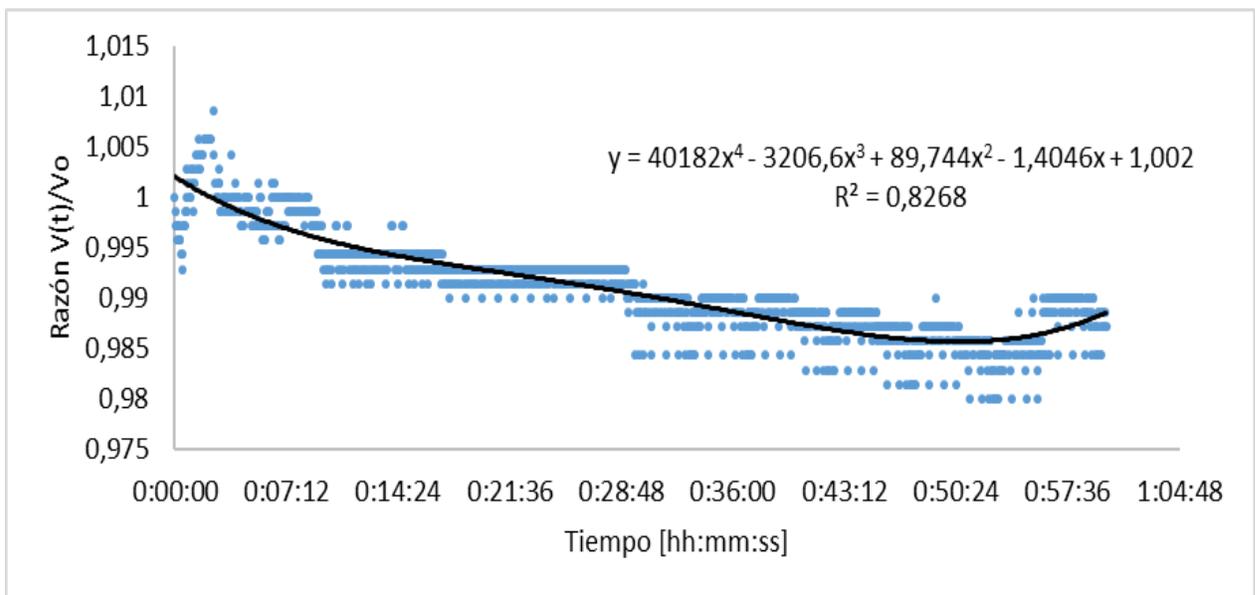


Figura 33: Efecto de gotas adheridas al recipiente en el voltaje medido.

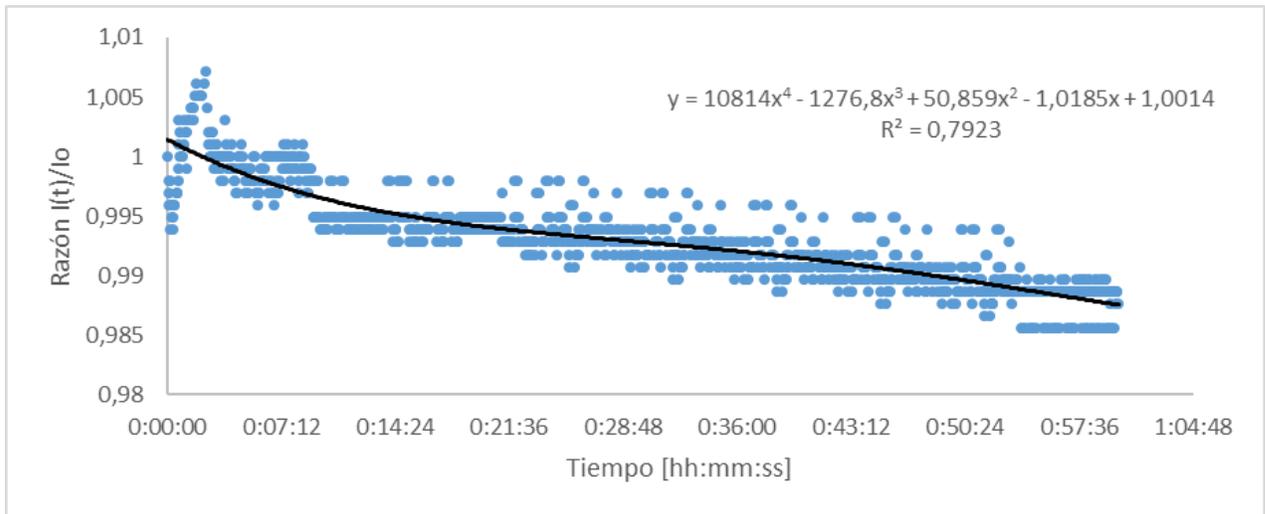


Figura 34: Efecto de gotas adheridas al recipiente en la corriente medida.

Como se puede observar en las figuras 32 y 33, la precisión de los valores medidos no varía más allá de un 2% con respecto a los iniciales. Se optó por incorporar este efecto en el error asociado a las mediciones en lugar de incluir factores correctivos. Esto se debe a que los coeficientes de determinación son bajos a pesar de corresponder a un polinomio de cuarto grado, e incluso menores para polinomios de menor orden, y el error asociado a una corrección de esta índole superaría el 2%. Para considerar esta variación en los resultados, es importante no exceder un tiempo de medición de una hora.

A continuación, se muestran los valores medidos de la celda solar y las curvas obtenidas por medio de regresiones lineales, para configuraciones en presencia de nubosidad además de sus resultados más relevantes

### 5.3.1 Caso 3.1000

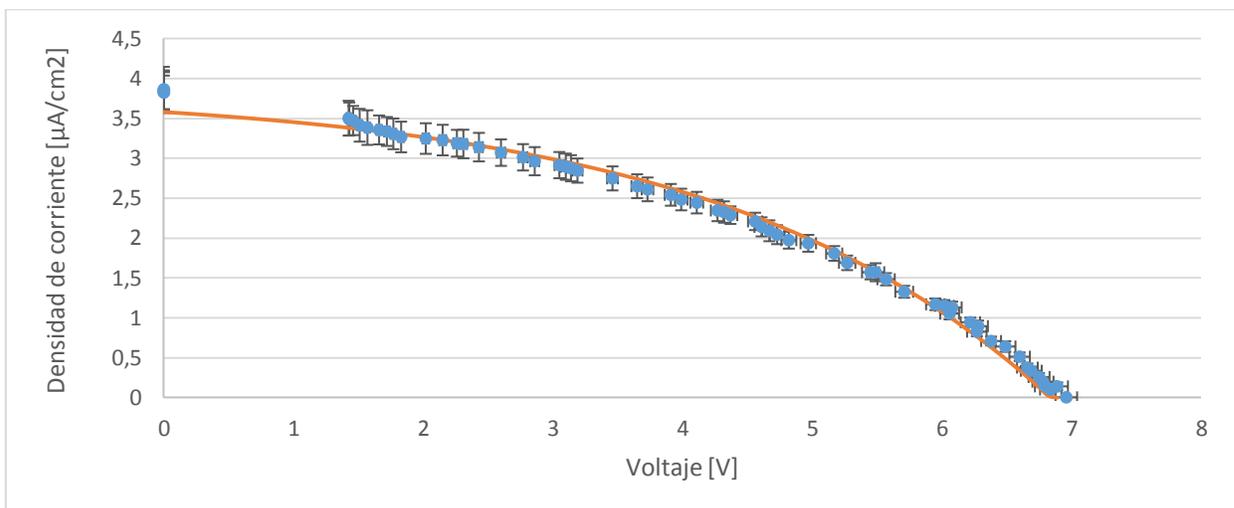


Figura 35: Curva IV para la configuración 3.1000

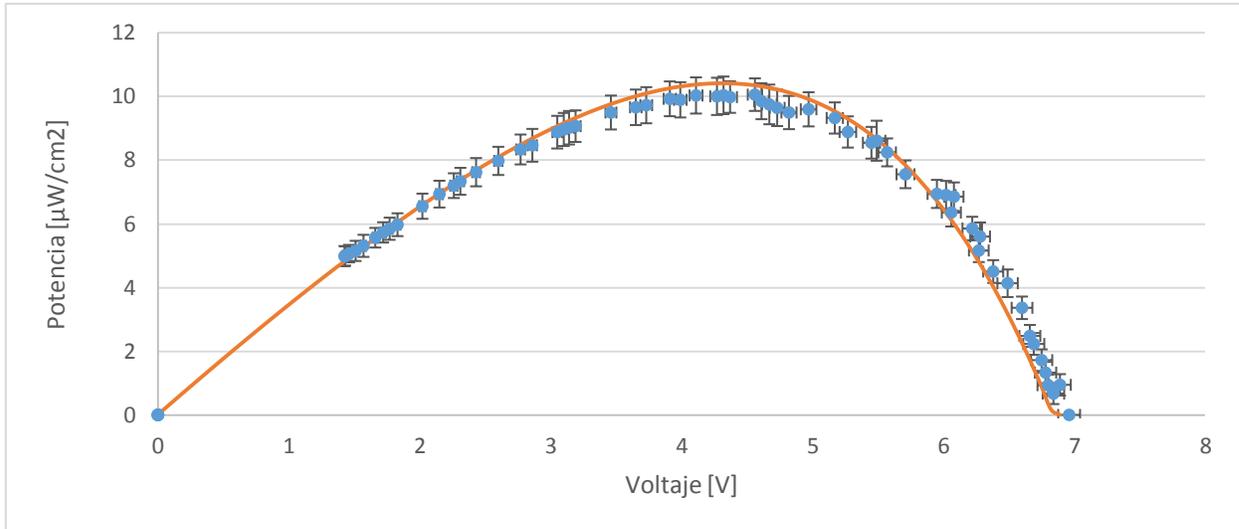


Figura 36: Curva de potencia para la configuración 3.1000

Tabla 6: Resumen de mediciones, Caso 3.1000

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente Corto Circuito	$I_{sc}$	3,84	$[\mu A/cm^2]$
Voltaje de Circuito Abierto	$V_{oc}$	6,97	[V]
Voltaje nominal	$V_{mp}$	4,56	[V]
Corriente nominal	$I_{mp}$	2,21	$[\mu A/cm^2]$
Potencia Máxima	$P_{max}$	10,06	$[\mu W/cm^2]$
Temperatura de Celda	$T_{panel}$	16,5	[C]
Factor de llenado	$FF$	0,32	

Tabla 7: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 3.1000

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente de saturación oscura	$I_0$	0,276	$[\mu A/cm^2]$
Pendiente	$q/mk_bT$	0,381	$[V^{-1}]$
Coefficiente de determinación	$R^2$	0,954	

### 5.3.2 Caso 3.1100

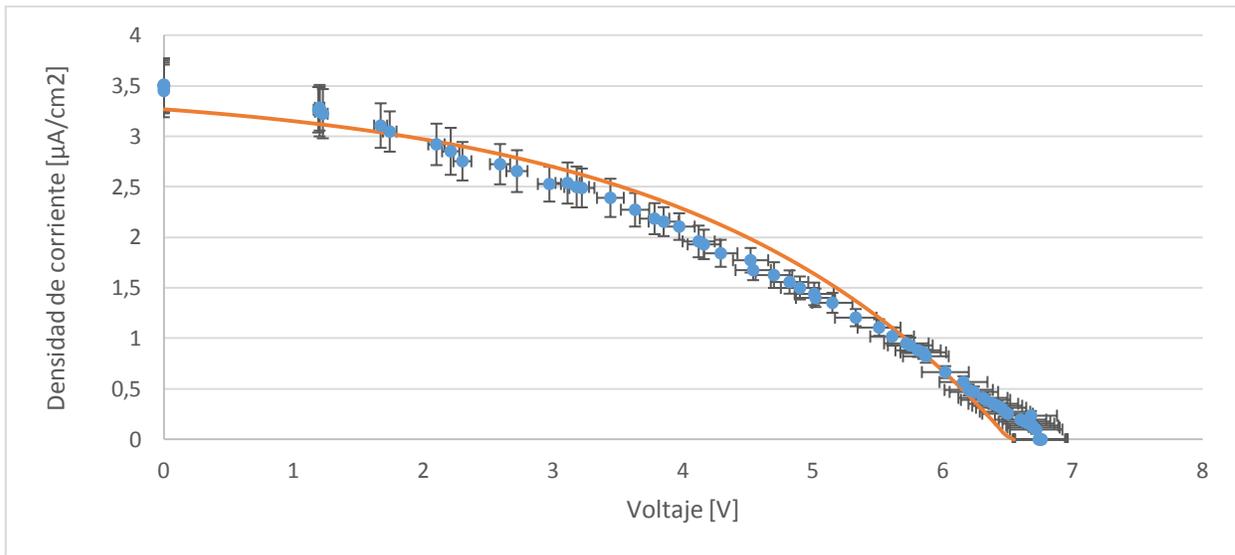


Figura 37: Curva IV para la configuración 3.1100

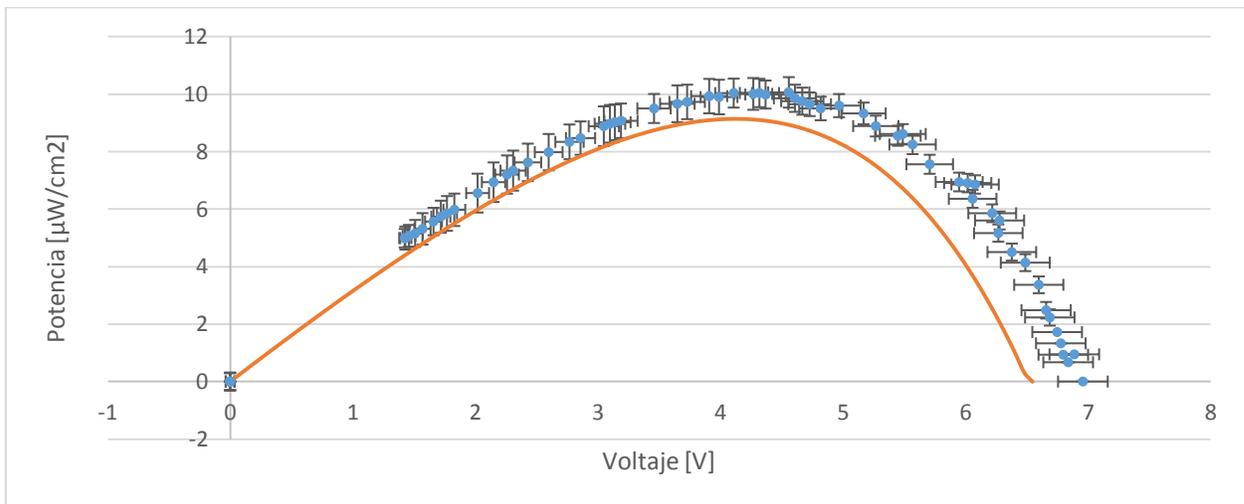


Figura 38: Curva de potencia para la configuración 3.1100

Tabla 8: Resumen de mediciones, Caso 3.1100

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente Corto Circuito	$I_{sc}$	3,49	$[\mu\text{A}/\text{cm}^2]$
Voltaje de Circuito Abierto	$V_{oc}$	6,75	$[\text{V}]$
Voltaje nominal	$V_{mp}$	3,97	$[\text{V}]$
Corriente nominal	$I_{mp}$	2,11	$[\mu\text{A}/\text{cm}^2]$
Potencia Máxima	$P_{max}$	8,37	$[\mu\text{W}/\text{cm}^2]$
Temperatura de Celda	$T_{panel}$	17	$[\text{C}]$
Factor de llenado	$FF$	0,31	

Tabla 9: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 3.1100

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente de saturación oscura	$I_0$	0,225	$[\mu A/cm^2]$
Pendiente	$q/mk_bT$	0,421	$[V^{-1}]$
Coefficiente de determinación	$R^2$	0,955	

### 5.3.3 Caso 3.1110

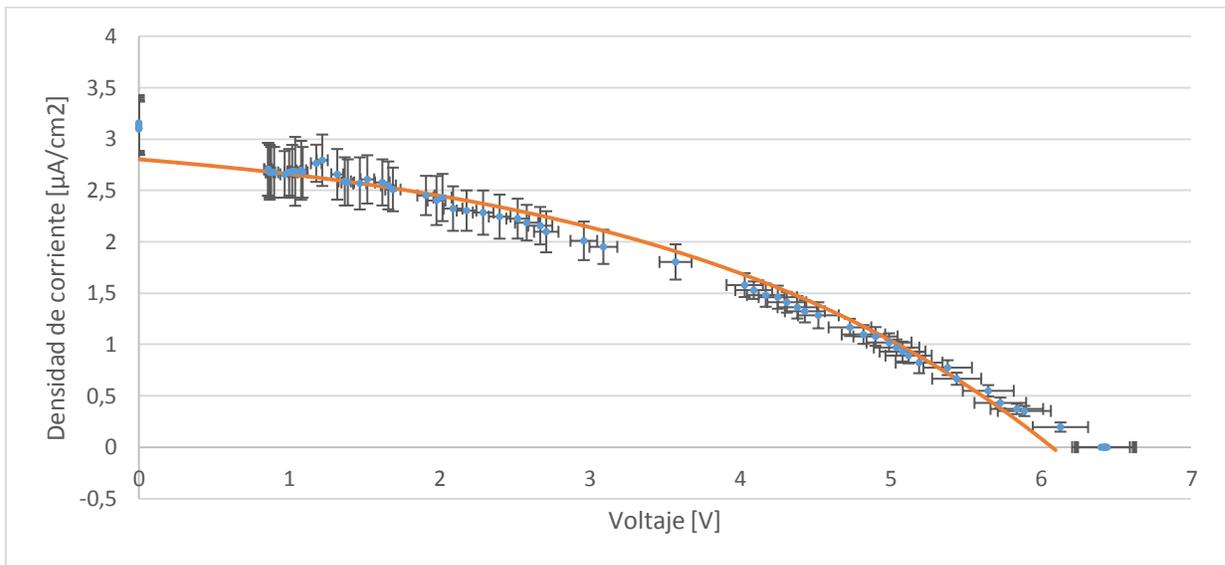


Figura 39: Curva IV para la configuración 3.1110

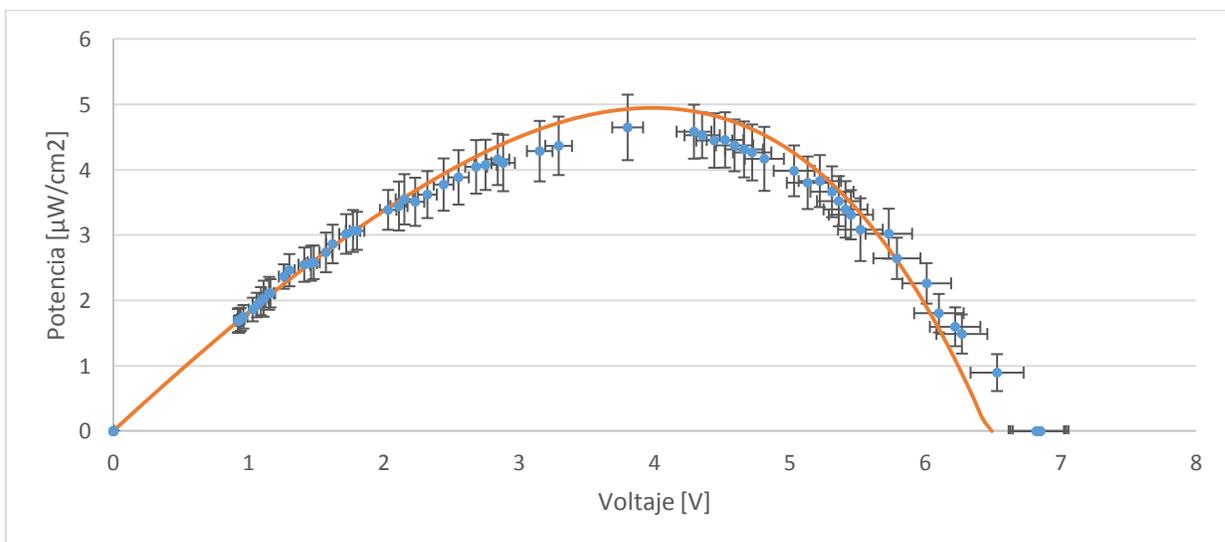


Figura 40: Curva de potencia para la configuración 3.1110

Tabla 10: Resumen de mediciones, Caso 3.1110

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente Corto Circuito	$I_{sc}$	3,12	$[\mu A/cm^2]$
Voltaje de Circuito Abierto	$V_{oc}$	6,42	[V]
Voltaje nominal	$V_{mp}$	3,57	[V]
Corriente nominal	$I_{mp}$	1,8	$[\mu A/cm^2]$
Potencia Máxima	$P_{max}$	6,44	$[\mu W/cm^2]$
Temperatura de Celda	$T_{panel}$	17	[C]
Factor de llenado	$FF$	0,28	

Tabla 11: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 3.1110

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente de saturación oscura	$I_0$	0,213	$[\mu A/cm^2]$
Pendiente	$q/mk_bT$	0,314	$[V^{-1}]$
Coefficiente de determinación	$R^2$	0,98	

### 5.3.4 Caso 3.1111

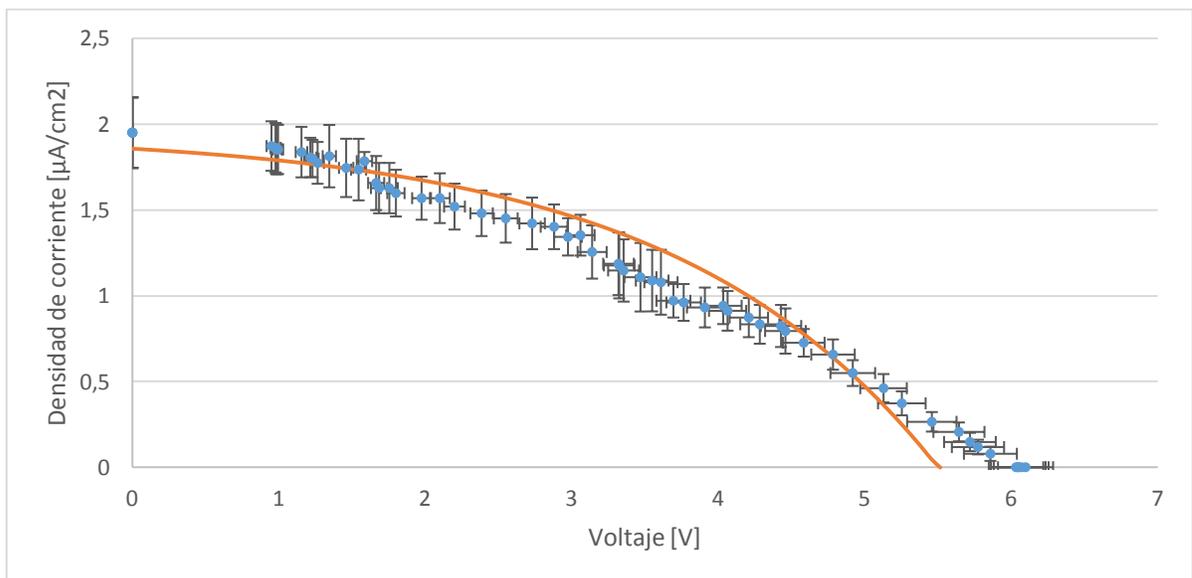


Figura 41: Curva IV para la configuración 3.1111

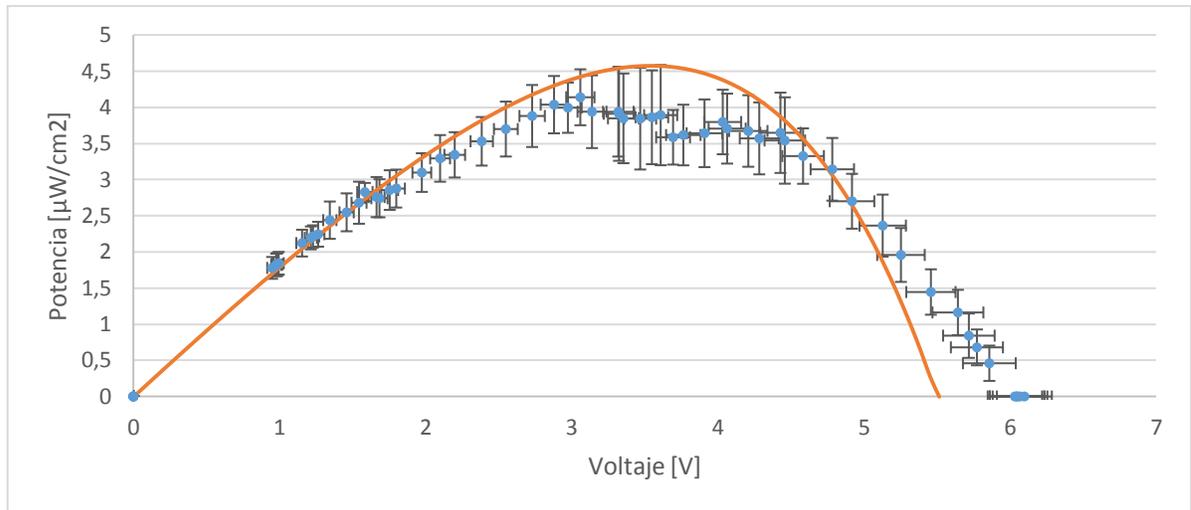


Figura 42: Curva de potencia para la configuración 3.1111

Tabla 12: Resumen de mediciones, Caso 3.1111

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente Corto Circuito	$I_{SC}$	1,95	$[\mu A/cm^2]$
Voltaje de Circuito Abierto	$V_{oc}$	6,06	[V]
Voltaje nominal	$V_{mp}$	3,06	[V]
Corriente nominal	$I_{mp}$	1,35	$[\mu A/cm^2]$
Potencia Máxima	$P_{max}$	4,14	$[\mu W/cm^2]$
Temperatura de Celda	$T_{panel}$	17	[C]
Factor de Llenado	$FF$	0,22	

Tabla 13: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 3.1111

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente de saturación oscura	$I_0$	0,092	$[\mu A/cm^2]$
Pendiente	$q/mk_bT$	0,555	$[V^{-1}]$
Coeficiente de determinación	$R^2$	0,916	

### 5.3.5 Caso 3.0100

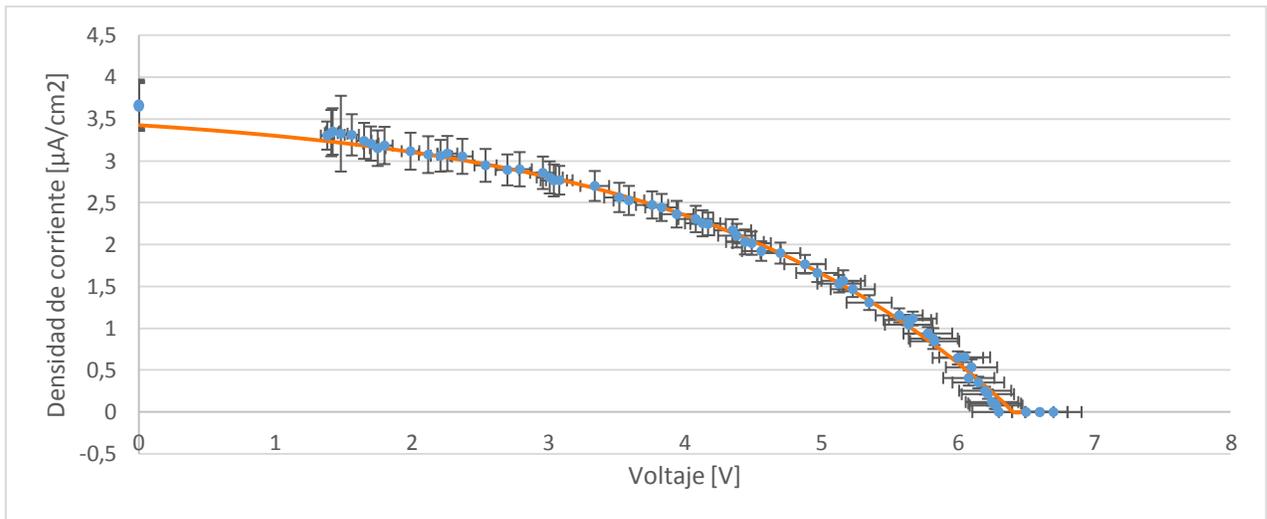


Figura 43: Curva IV para la configuración 3.0100

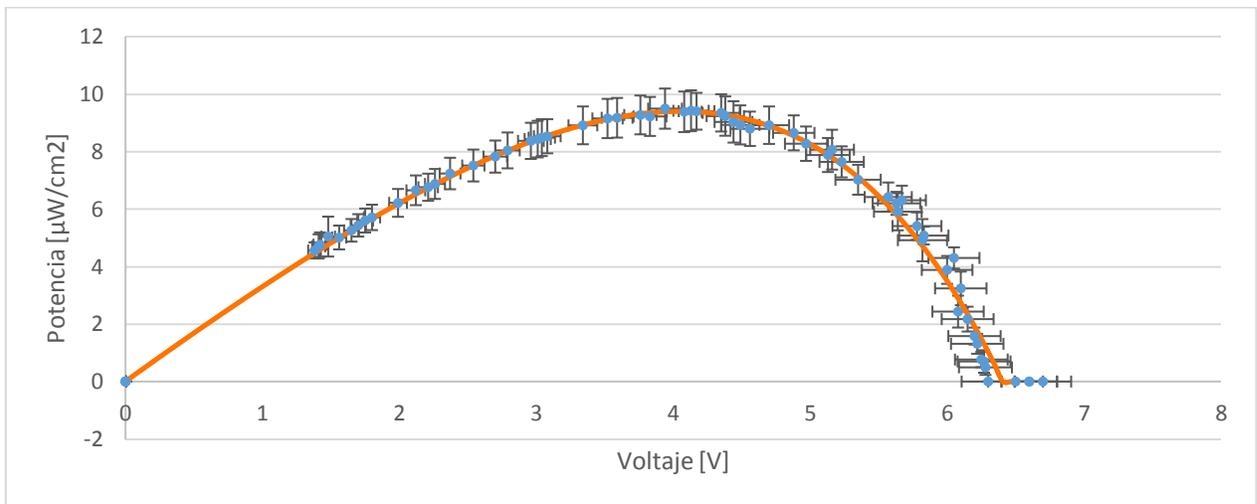


Figura 44: Curva de potencia para la configuración 3.0100

Tabla 14: Resumen de mediciones, Caso 3.0100

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente Corto Circuito	$I_{sc}$	3,66	$[\mu\text{A}/\text{cm}^2]$
Voltaje de Circuito Abierto	$V_{oc}$	6,54	$[\text{V}]$
Voltaje nominal	$V_{mp}$	3,94	$[\text{V}]$
Corriente nominal	$I_{mp}$	2,41	$[\mu\text{A}/\text{cm}^2]$
Potencia Máxima	$P_{max}$	9,49	$[\mu\text{W}/\text{cm}^2]$
Temperatura de Celda	$T_{panel}$	17,5	$[\text{C}]$
Factor de Llenado	$FF$	0,37	

Tabla 15: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 3.0100

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente de saturación oscura	$I_0$	0,237	$[\mu A/cm^2]$
Pendiente	$q/mk_bT$	0,426	$[V^{-1}]$
Coefficiente de determinación	$R^2$	0,9875	

### 5.3.6 Caso 3.0010

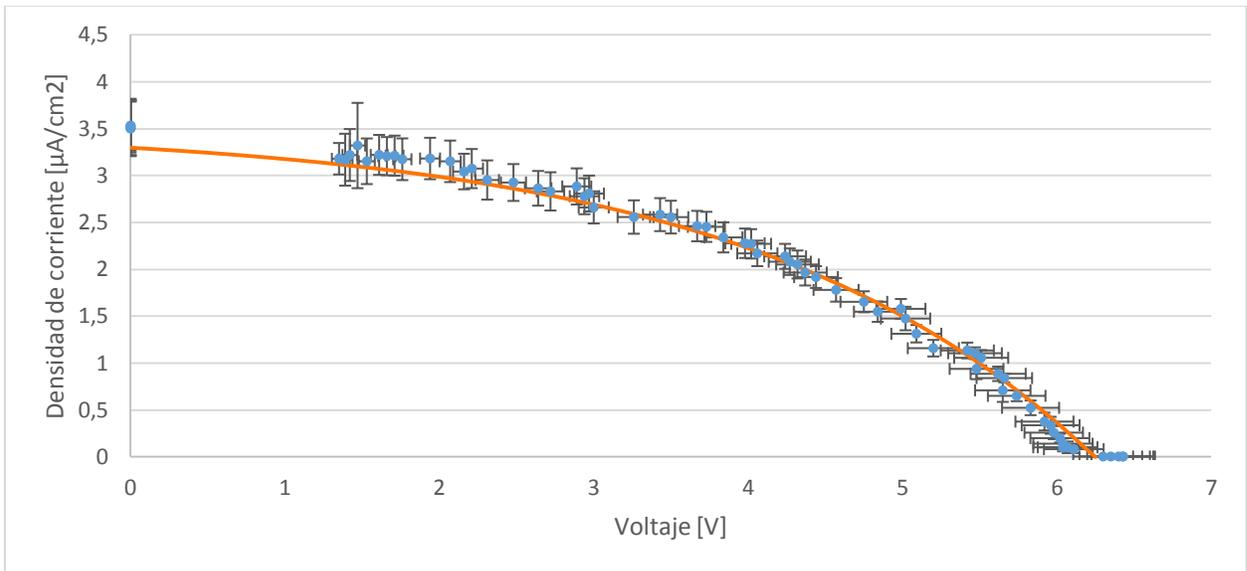


Figura 45: Curva IV para la configuración 3.0010

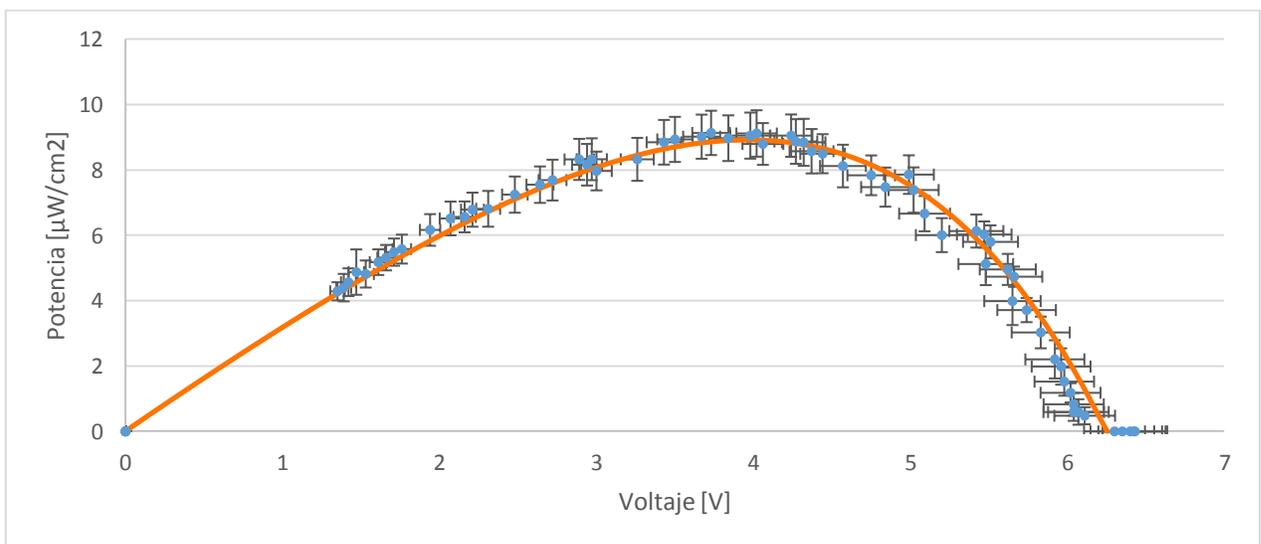


Figura 46: Curva de potencia para la configuración 3.0010

Tabla 16: Resumen de mediciones, Caso 3.0010

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente Corto Circuito	$I_{sc}$	3,51	$[\mu A/cm^2]$
Voltaje de Circuito Abierto	$V_{oc}$	6,38	$[V]$
Voltaje nominal	$V_{mp}$	3,73	$[V]$
Corriente nominal	$I_{mp}$	2,45	$[\mu A/cm^2]$
Potencia Máxima	$P_{max}$	9,14	$[\mu W/cm^2]$
Temperatura de Celda	$T_{panel}$	17	$[C]$
Factor de Llenado	$FF$	0,34	

Tabla 17: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 3.0010

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente de saturación oscura	$I_0$	0,214	$[\mu A/cm^2]$
Pendiente	$q/mk_bT$	0,448	$[V^{-1}]$
Coefficiente de determinación	$R^2$	0,996	

### 5.3.7 Caso 3.0001

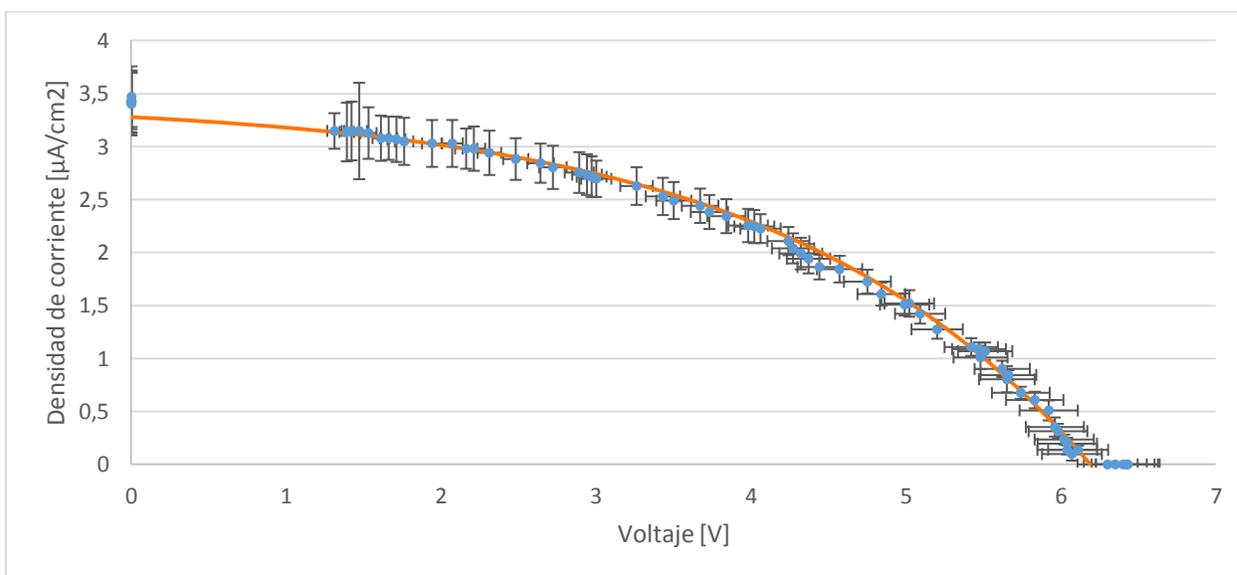


Figura 47: Curva IV para la configuración 3.0001

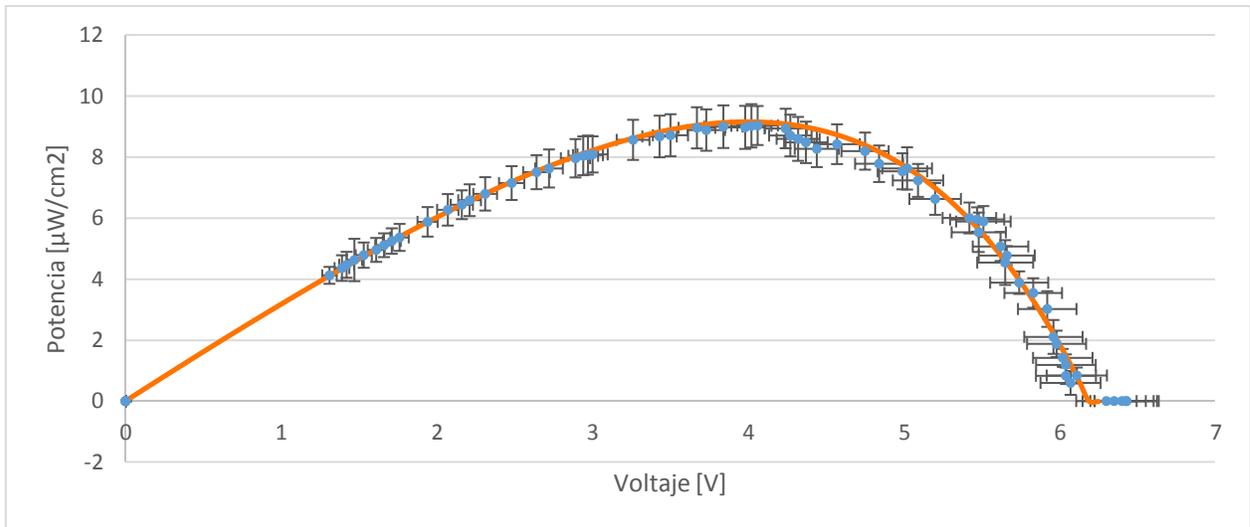


Figura 48: Curva de potencia para la configuración 3.0001

Tabla 18: Resumen de mediciones, Caso 3.0001

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente Corto Circuito	$I_{sc}$	3,43	$[\mu A/cm^2]$
Voltaje de Circuito Abierto	$V_{oc}$	6,38	$[V]$
Voltaje nominal	$V_{mp}$	4,06	$[V]$
Corriente nominal	$I_{mp}$	2,23	$[\mu A/cm^2]$
Potencia Máxima	$P_{max}$	9,04	$[\mu W/cm^2]$
Temperatura de Celda	$T_{panel}$	17	$[C]$
Factor de llenado	$FF$	0,35	

Tabla 19: Valores obtenidos en regresión lineal, Caso 3.0001

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Corriente de saturación oscura	$I_0$	0,1519	$[\mu A/cm^2]$
Pendiente	$q/mk_bT$	0,504	$[V^{-1}]$
Coefficiente de determinación	$R^2$	0,996	

## 6 Análisis de Resultados

Los valores medidos en caso de recepción directa se comparan al análisis teórico hecho para la absorción luminosa del panel, se obtuvieron para el caso teórico una producción de corriente máxima de  $13,05 [\mu A/cm^2]$  y  $6,48 [\mu A/cm^2]$  para la medición de  $I_{sc}$  en el caso homólogo medido (recepción directa). Ambos datos se encuentran dentro del mismo orden de magnitud, donde el dato medido es aproximadamente un 49,6% de su valor teórico. Esto responde a que el panel fotovoltaico no es utilizado en el rango para el cual se mide su eficiencia ( $25^\circ C$  y  $G = 1 [kW/m^2]$ ), valor asumido en los cálculos, traduciéndose en un valor de eficiencia disminuido. Si se asume que las aproximaciones hechas para el caso teórico son suficientemente certeras, será la eficiencia del panel el parámetro que sopesará este decaimiento, considerando entonces una eficiencia de celda fotovoltaica para las condiciones de operación medidas de

$$\eta_{cop} = 4,98\%$$

De un análisis hecho a datos medidos en la literatura [23], donde se muestra el efecto de la disminución de radiación en la eficiencia de paneles fotovoltaicos, se observa que, para una temperatura de  $25^\circ C$ , el comportamiento de la eficiencia se ajusta a una curva logarítmica como se muestra en la figura 48.

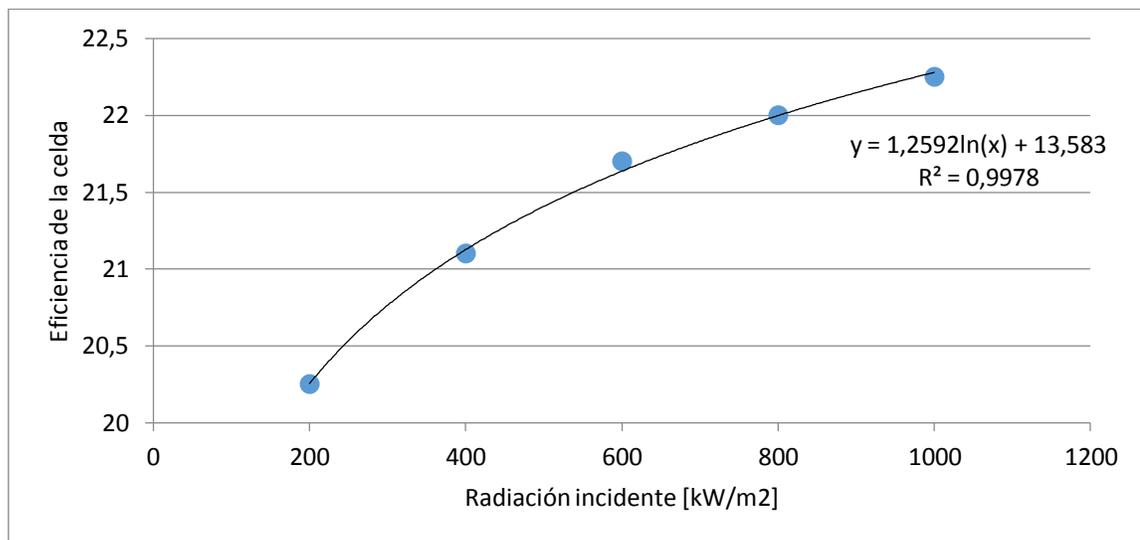


Figura 49: Comparación de eficiencia y radiación incidente.

Aplicando esta tendencia, la celda utilizada en este caso representaría una eficiencia de 3,02%, junto a esto se debe considerar que la celda estudiada se encuentra a  $9^\circ C$  por debajo de la graficada en la figura 48, por lo cual, su eficiencia debería ser mayor en aproximadamente 1,2%, dando una eficiencia final de 4,22%, similar al valor medido.

Un contraste de las curvas medidas se puede apreciar en las figuras 49 (curva IV) y figura 51 (curva de potencia), donde se comparan los casos de recepción directa (caso 1) y en presencia del

recipiente contenedor sin interferencia nubosa (caso 2), las figuras 50 y 52 muestran la comparación de las regresiones de estos datos.

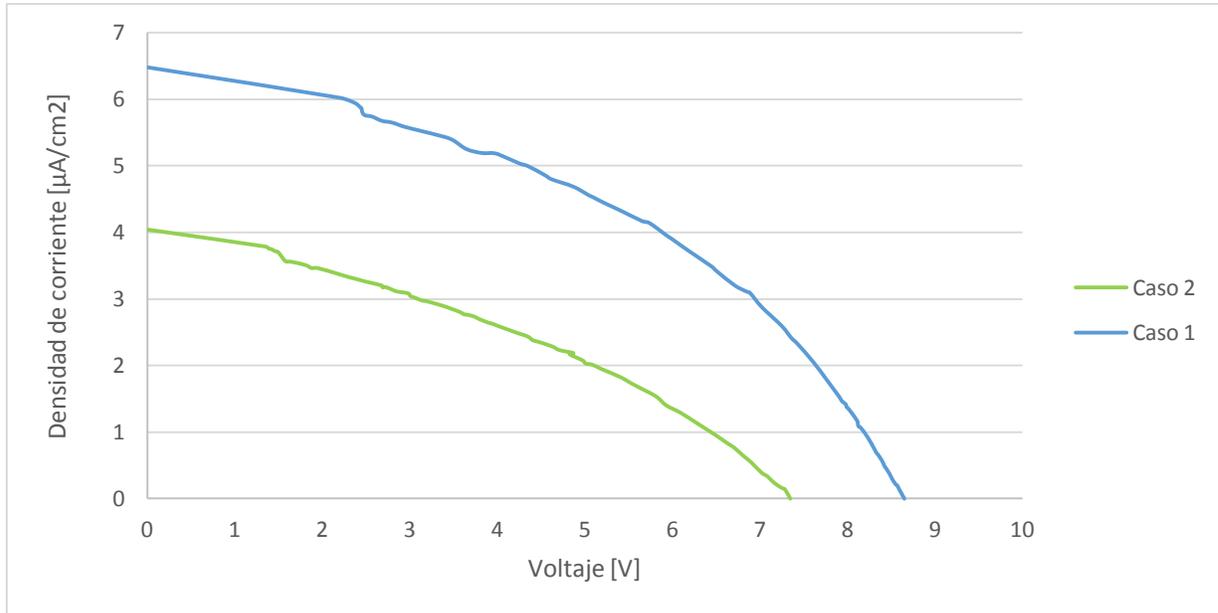


Figura 50: Contraste de datos IV medidos para casos sin interferencia nubosa

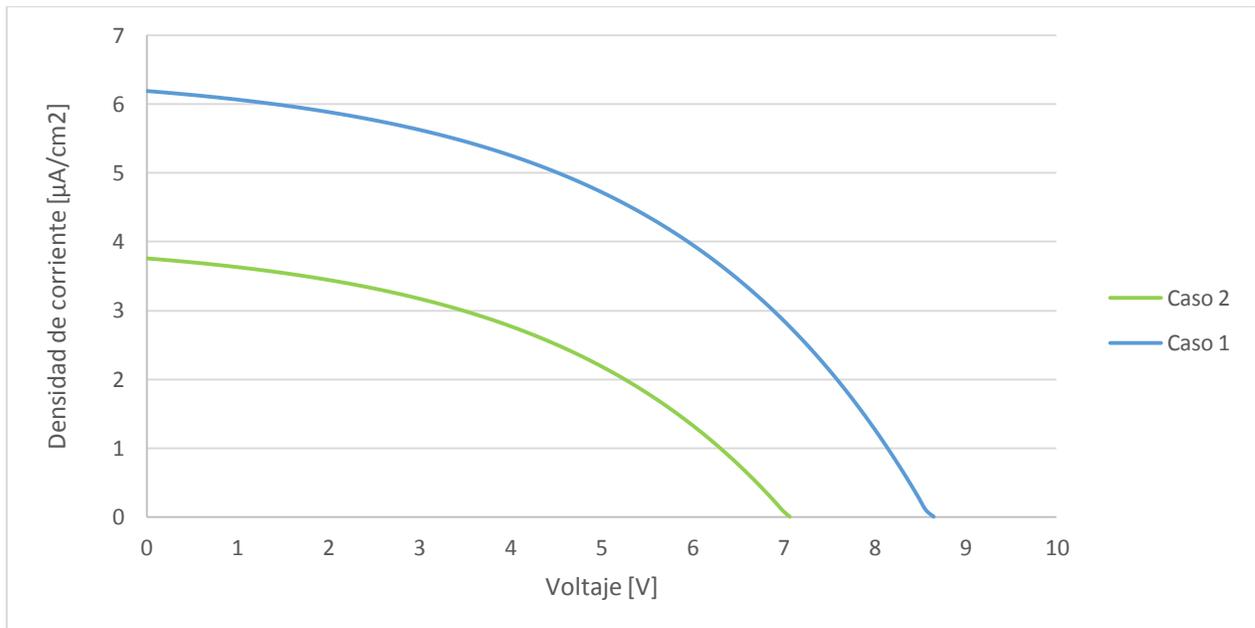


Figura 51: Contraste de curvas de tendencia IV para casos sin interferencia nubosa.

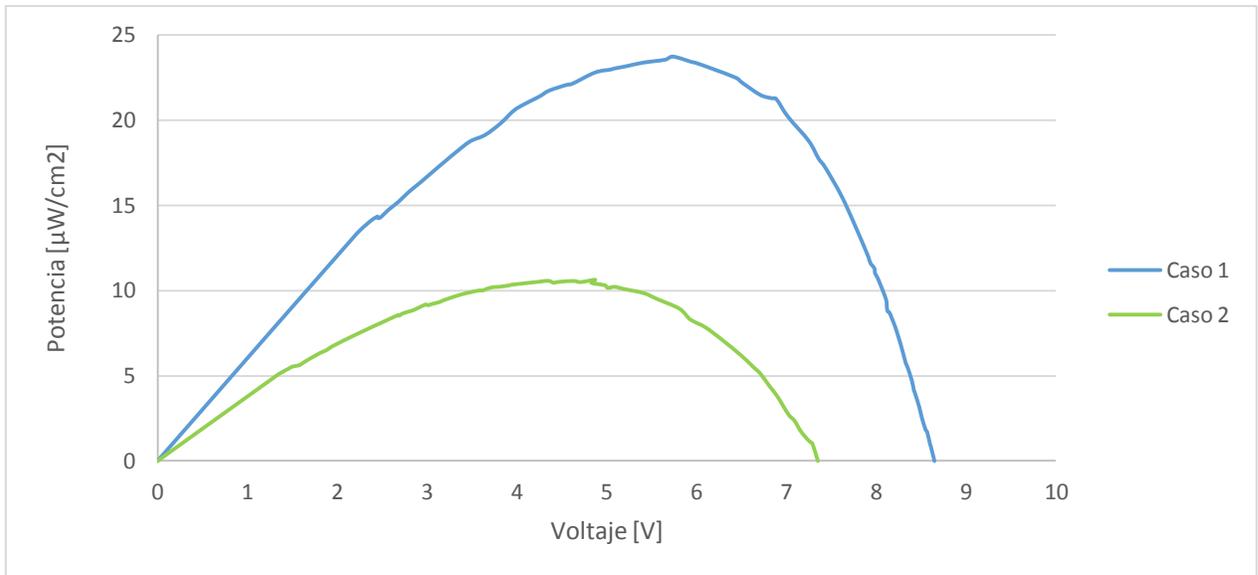


Figura 52: Contraste de datos medidos, potencia para casos sin interferencia nubosa

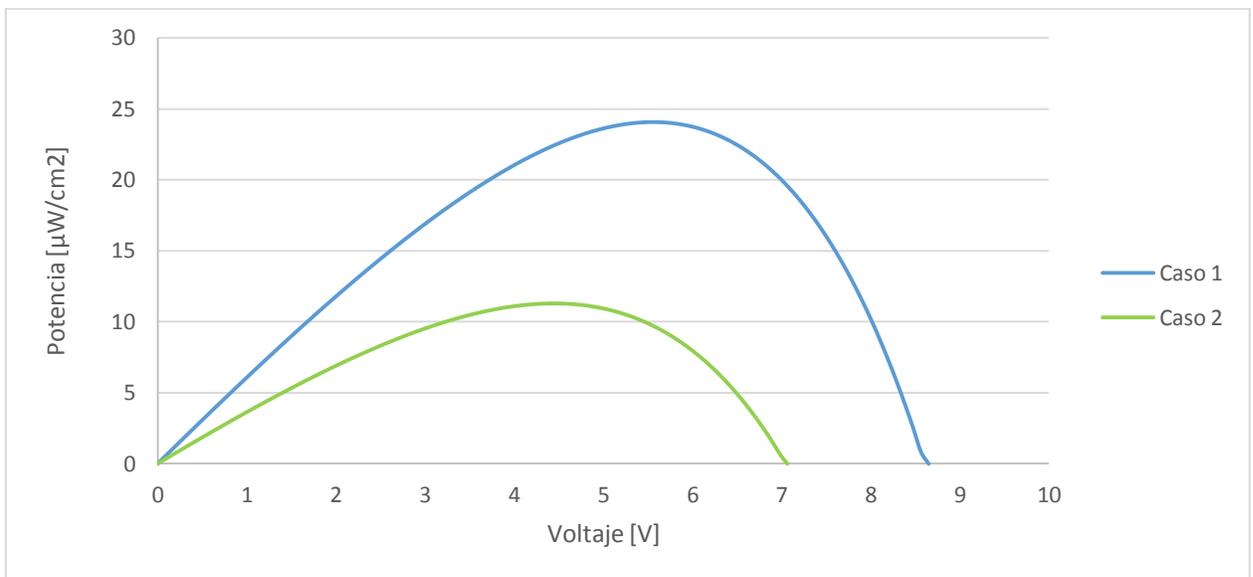


Figura 53: Contraste de curvas tendencias para potencia, casos sin interferencia nubosa.

Para estos datos se muestra que el comportamiento del montaje experimental es similar al descrito de manera teórica por la ecuación del diodo ideal. La presencia del recipiente contenedor impacta de manera significativa en la recepción de radiación por parte del panel, disminuyendo la potencia máxima generada a un 44,8% de la original.

Los valores extremos de la curva característica se ven disminuidos, donde  $V_{oc}$  decae aun 85% de su valor inicial, mientras que  $I_{sc}$  decae a un 62,3%, por tanto, no es un efecto que tienda a escalar en su totalidad la curva, sino que altera su forma, esto se traduce en un cambio en la

pendiente de la regresión lineal de 0,361 a 0,381, es decir, impacta en mayor proporción la intensidad de corriente que el voltaje.

Los valores de  $I_{sc}$  tienen relación directa con la potencia incidente en el panel fotovoltaico, por tanto, ya que esta disminuye en un 62%, según la ecuación (4.2) la absorción del recipiente cumple

$$\frac{R'}{R} = (1 - (r_m + a_m))^5 = 0,62$$

Con esto los coeficientes de reflexión y absorción del vidrio cumplen

$$r_m + a_m = 1 - \sqrt[5]{0,62} = 0,0912$$

Optando por mantener las proporciones entre estos, expuesta en la sección 4.3.3 (5-6% reflejado y 8-9% absorbido) se obtiene

$$5,5x + 8,5x = 0,0912$$

$$x = 0,0065$$

Con lo cual los coeficientes quedan determinados por

$$r_m = 0,0358 = 3,58\% \quad , \quad a_m = 0,0553 = 5,53\%$$

Un contraste de las curvas IV medidas se puede apreciar en la figura 53, donde se comparan los casos en presencia de nubosidad, para variaciones en la posición del compartimiento utilizado con el caso de interferencia del recipiente contenedor, la figura 54 muestra la comparación de las regresiones de estos datos, la misma relación se presenta para las curvas de potencia en las figuras 55 y 56.

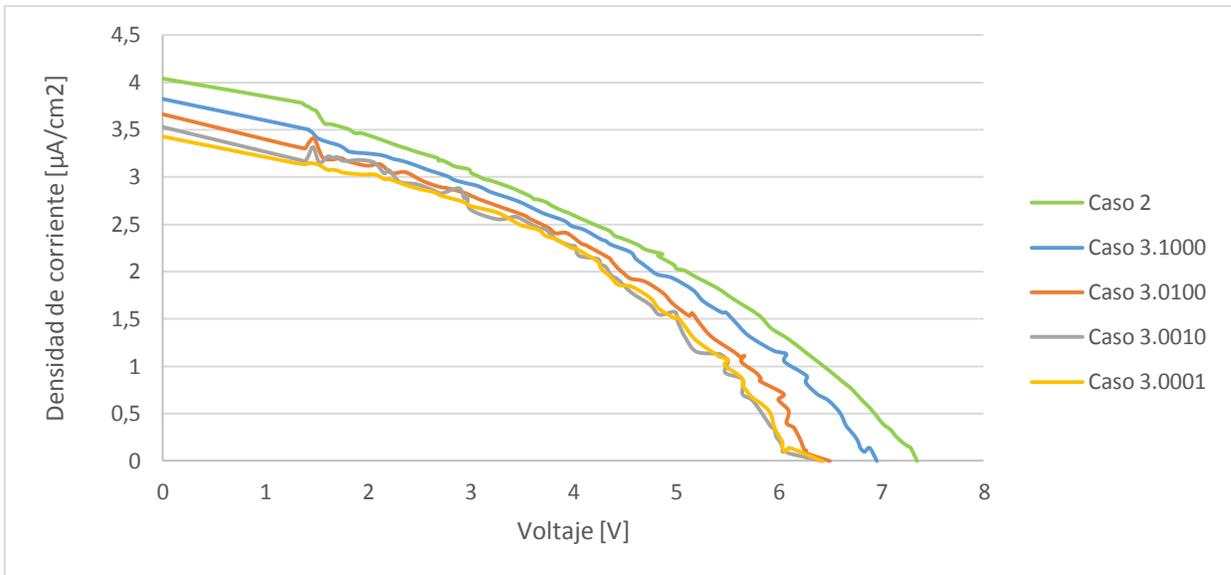


Figura 54: Comparación de datos medidos, curvas IV, cambio en la posición de nubosidad.

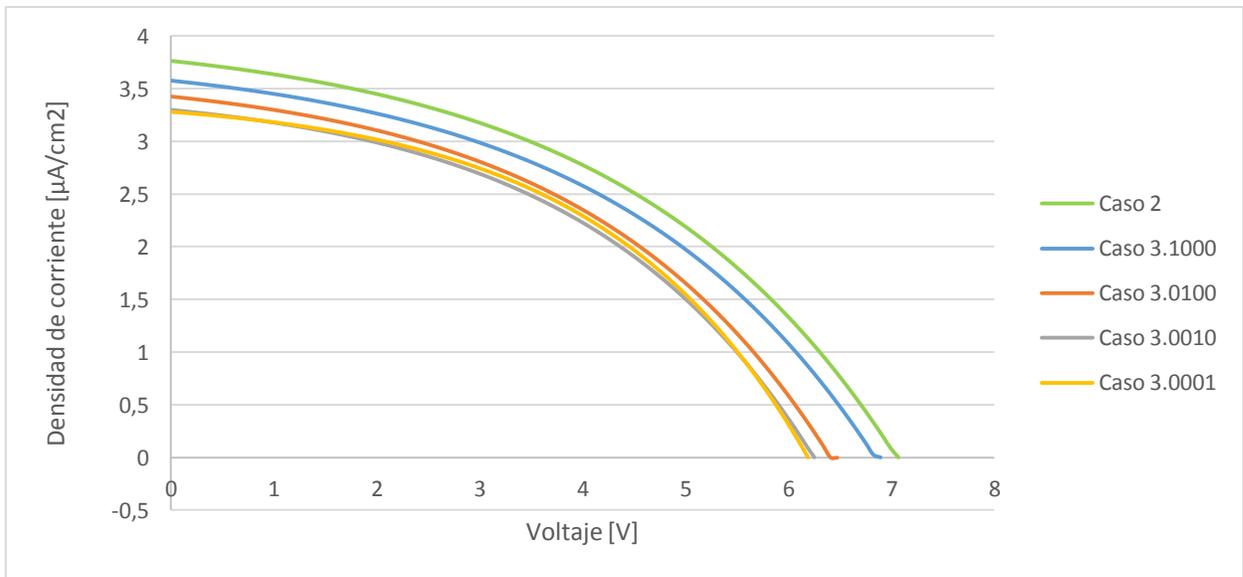


Figura 55: Comparación de tendencias, curvas IV, cambio en la posición de nubosidad

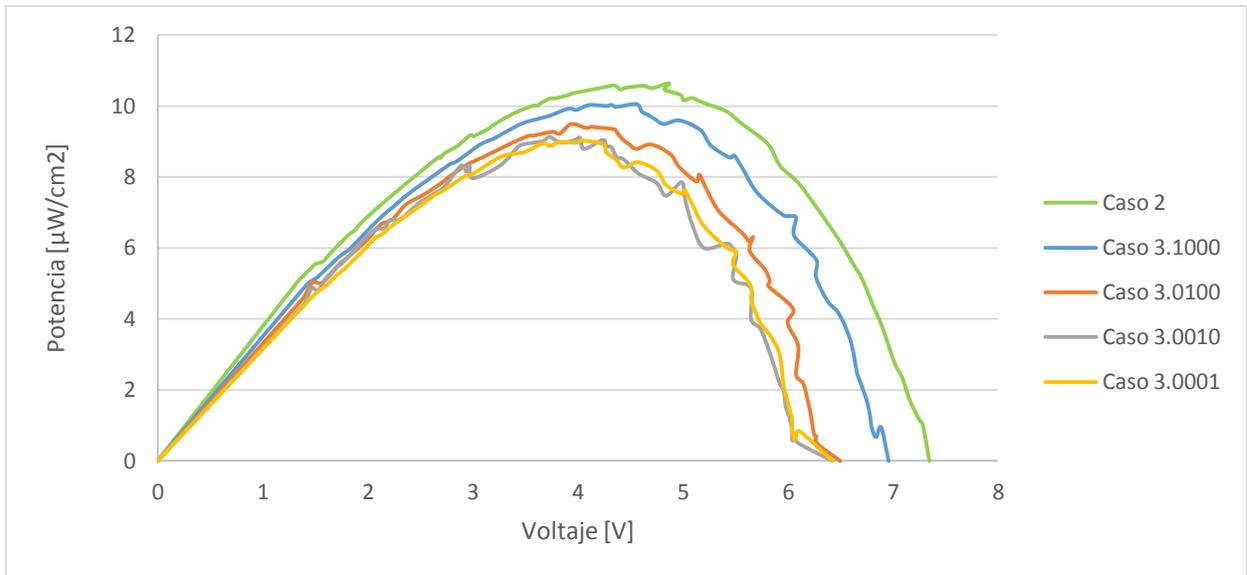


Figura 56: Comparación de datos medidos, curvas de potencia, cambio en la posición de nubosidad

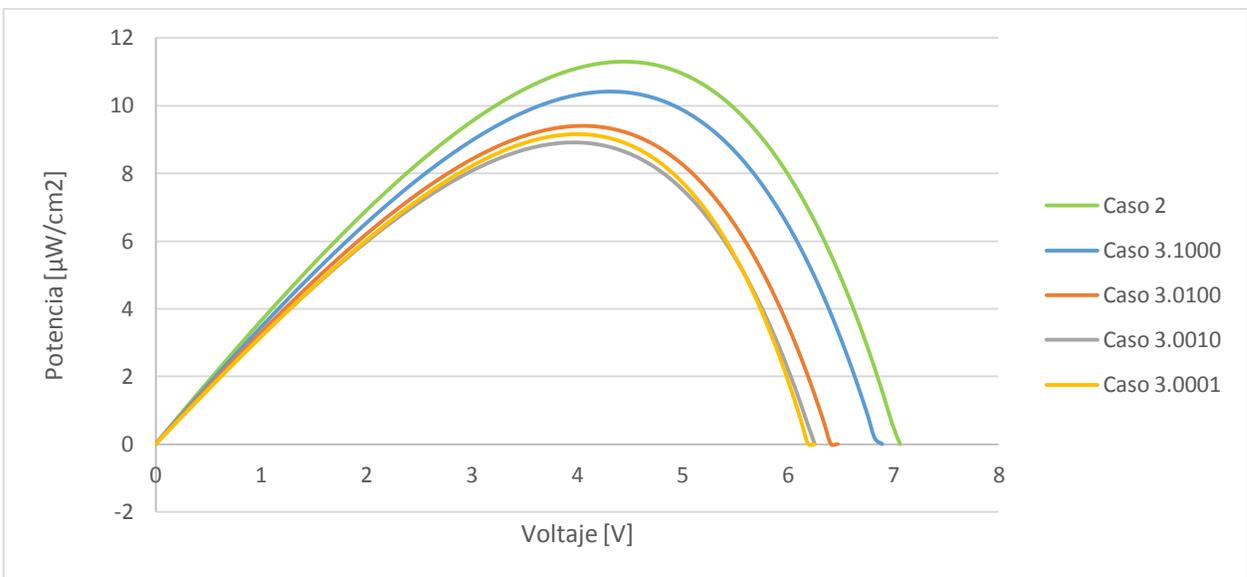


Figura 57: Comparación de tendencias, curvas de potencia, cambio en la posición de nubosidad

Ya que valores de  $I_{sc}$  tienen relación directa con la potencia incidente en el panel fotovoltaico, según la ecuación (4.4), se tiene que la absorción combinada del recipiente y la nubosidad cumplen las relaciones

$$\frac{R'}{R} = (1 - (r_m + a_m))^5 \cdot (1 - (r_c + a_c))^i$$

$$\frac{R'}{R_{caso2}} = (1 - (r_c + a_c))^i$$

$$r_c + a_c = 1 - \sqrt[i]{\frac{R'}{R_{caso2}}}$$

Con  $i=1, 2, 3, 4$  dependiendo de la cantidad de recipientes con presencia nubosa.

Para el caso 3.1000

$$r_c + a_c = 1 - \frac{R'}{R_{caso2}} = 1 - \frac{I_{sc}}{I_{sc,caso2}} = 1 - 0,9505 = 0,0495$$

Con lo que se obtiene que una nubosidad de espesor 4 [cm] posicionada a 1[cm] frente a la celda solar, bloqueará un 4,95% de la radiación incidente.

Siguiendo este análisis para los casos de compartimientos únicos se obtiene

*Tabla 20: Fracción de radiación bloqueada según posición*

	Distancia de la nubosidad a la celda solar [cm]	Porción de radiación incidente bloqueada
Caso 3.1000	1	4,95 %
Caso 3.0100	5,5	9,41 %
Caso 3.0010	10	13,12 %
Caso 3.0001	14,5	15,1 %

Se aprecia en la figura 54 que esta porción de radiación absorbida para nubosidades de iguales características va aumentando conforme aumenta la distancia a la celda.

La variación en la posición de la nubosidad presenta un comportamiento más cercano a escalar la curva IV que el producido por presencia del recipiente contenedor, llegando aparentemente, a un valor límite para los términos  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$ .

La potencia máxima generada tiende a disminuir conforme aumenta la distancia de la nubosidad a la placa, lo cual es concordante con la energía que es bloqueada en cada caso.

Los factores de llenado de estos casos no muestran una tendencia a aumentar o disminuir, si no que presentan oscilaciones.

Un contraste de las curvas IV medidas para el caso de aumento de compartimientos utilizados se puede apreciar en la figura 57 donde se comparan con el caso de interferencia del recipiente contenedor, la figura 58 muestra la comparación de las regresiones de estos datos. La misma relación se presenta para las curvas de potencia en las figuras 59 y 60.

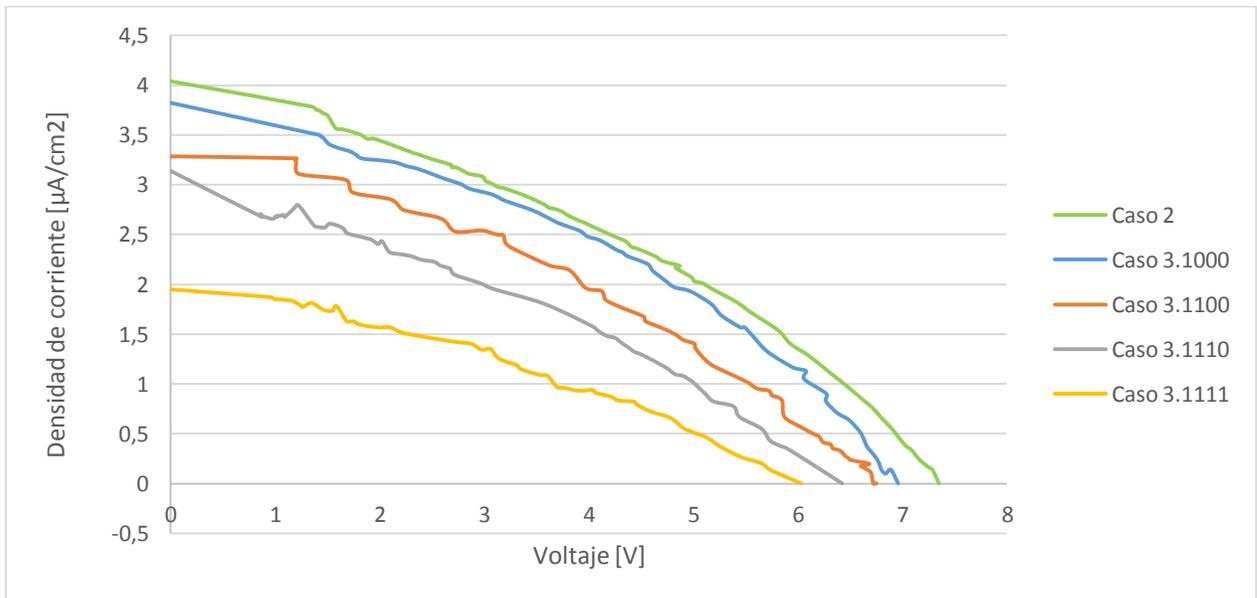


Figura 58: Comparación de datos medidos, curvas IV, aumento de espesor nuboso.

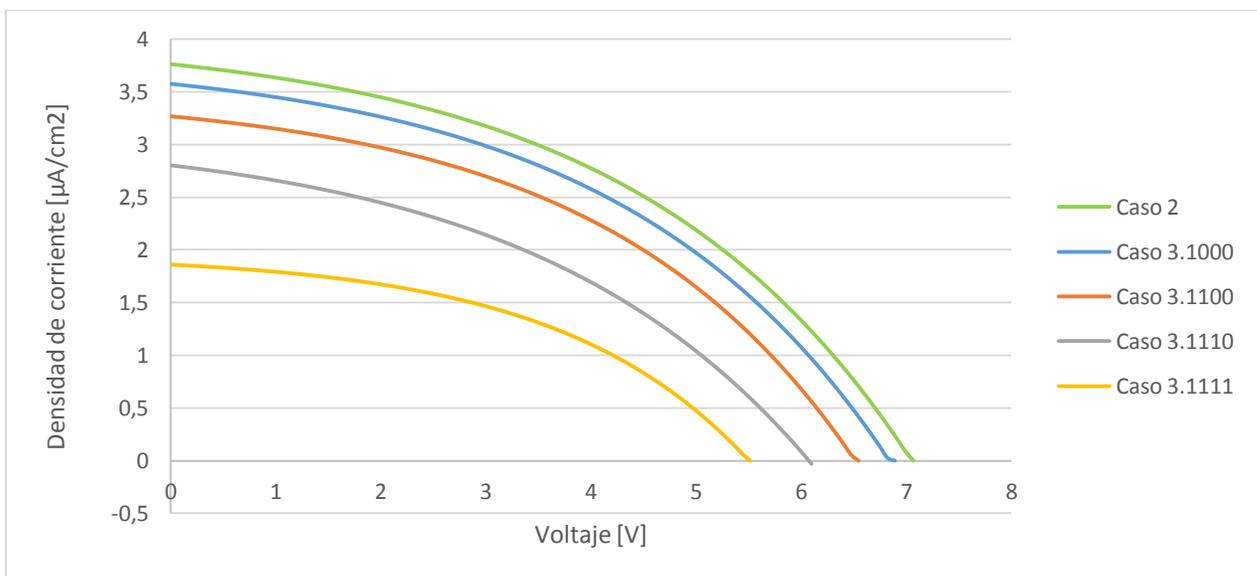


Figura 59: Comparación de tendencias, curvas IV, aumento de espesor nuboso.

Se aprecia en las curvas IV de las figuras 57 y 58 que el aumento de los compartimientos utilizados por la nubosidad no tiene únicamente a escalar la curva, al igual que en los casos de cambios de posición, sino a variar su forma, impactando en la pendiente de la regresión lineal. Esto indica que la intensidad de corriente en corto circuito se verá mermada en mayor proporción que el voltaje de circuito abierto.

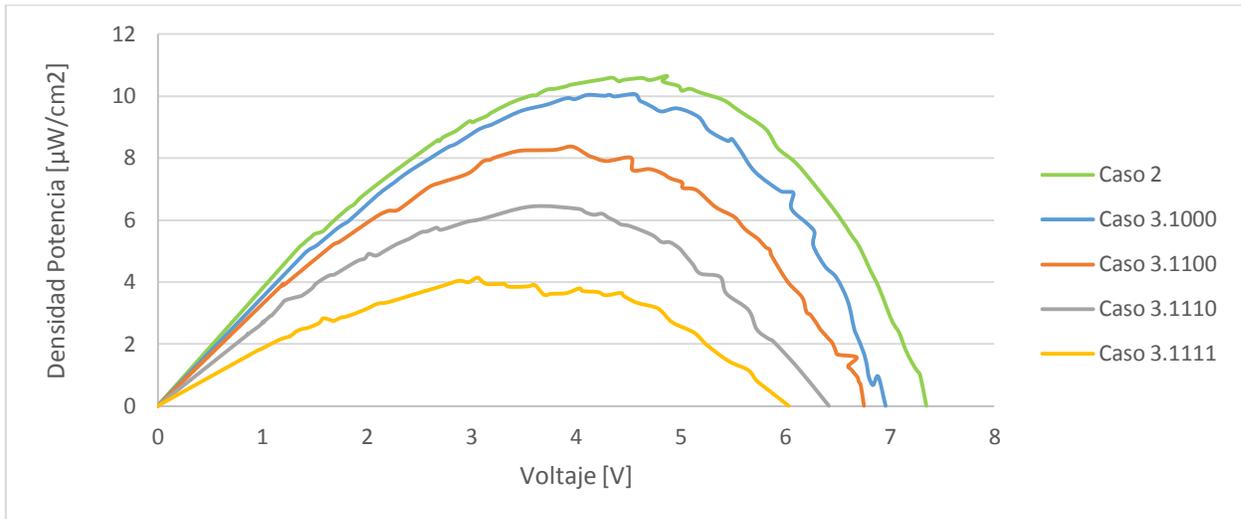


Figura 60: Comparación de datos medidos, curvas de potencia, aumento de espesor nuboso.

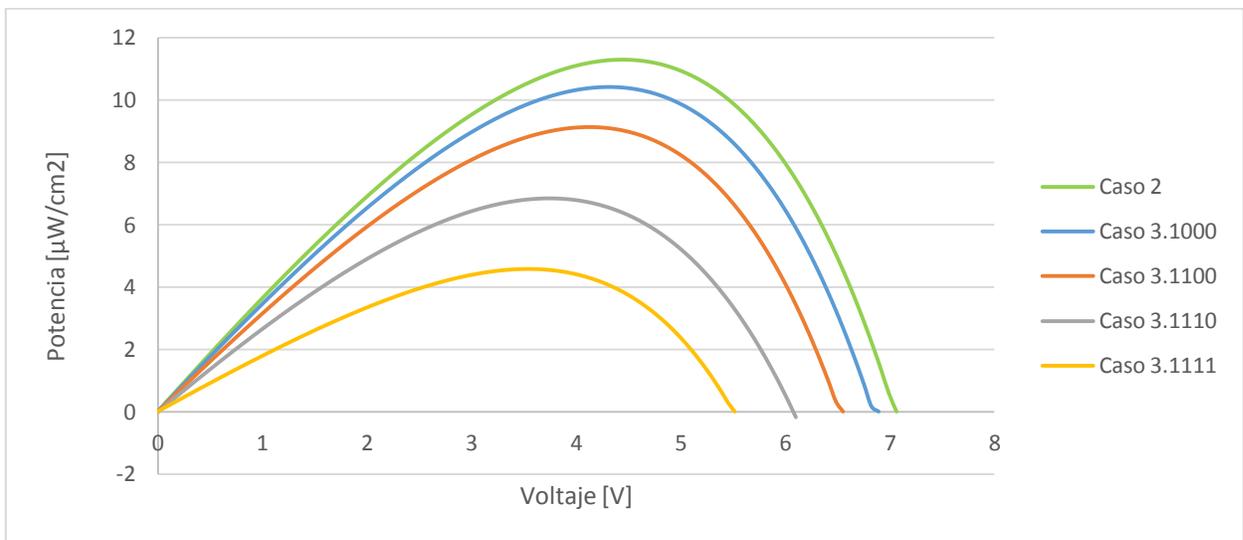


Figura 61: Comparación de tendencias, curvas de potencia, aumento de espesor nuboso.

Ya que el valor de  $I_{sc}$  tiene relación directa con la radiación incidente en el panel fotovoltaico, según la ecuación 4.4, se puede obtener la fracción de radiación bloqueada para el caso de aumento en el espesor nuboso utilizado, estos valores se hacen presente en la tabla 21.

Tabla 21: Fracción de radiación bloqueada según espesor total.

	Espesor total de nubosidad [cm]	Porción de radiación incidente bloqueada
Caso 3.1000	4	4,95 %
Caso 3.1100	8	7,06 %
Caso 3.1110	12	8,25 %
Caso 3.1111	16	21,56 %

Los factores de llenado en estos casos muestran una tendencia a disminuir conforme aumenta el espesor total de nubosidad utilizada

## Discusiones

Las curvas características muestran una buena adaptación al modelo del diodo ideal, donde las líneas de tendencia presentan un alto coeficiente de determinación, los datos medidos se posicionan mayormente en los rangos asociados al error de medición. Una mayor exactitud en los datos medidos podría ser obtenida si el montaje se realizase suspendiendo los componentes en lugar de montarlos en una plataforma.

La presencia del recipiente contenedor y el aumento en el espesor nuboso, modifican ligeramente la curva IV, esto se aprecia como pérdida en su perpendicularidad, disminuyendo el factor de llenado. Por otro lado, se aprecia que el efecto de la variación en la posición de la nubosidad tiende más bien a escalar la curva característica IV, manteniendo su forma.

Amplificar el espesor de la nubosidad aumenta la porción de radiación bloqueada, pero esto no afecta proporcionalmente a la generación de corriente máxima en el panel. La tendencia de este comportamiento no es clara debido a la poca cantidad de casos evaluados. Ya que la nubosidad presenta fenómenos de absorción y reflexión, la merma en la radiación debería tender a anular la generación del panel para nubosidades de espesor muy elevado, debido a esto se esperaría un aumento menos significativo en el bloqueo radiativo a medida que se incremente el espesor hasta dichos casos.

El efecto de la adherencia de gotas en las paredes del recipiente muestra un leve aumento en los datos medidos para los primeros minutos, es probable que dicho efecto se produzca porque el tamaño de gotas adheridas alcanza un valor que favorece la transición del haz luminoso a través de estas, el cual debe ser mayor a las gotas generadas por el humidificador, es decir, 5  $\mu\text{m}$ . A partir de tamaños superiores se genera una disminución de los valores medidos, sin una clara tendencia.

## 7 Conclusiones

Se logra diseñar y construir un montaje experimental que representa la interacción de nubosidad con radiación incidente sobre ella, para alteraciones en su espesor y distancia al panel solar receptor. La nubosidad generada cuenta con una densidad de  $0,7063 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  y diámetros de gotas que varían entre 3 a 5  $[\mu\text{m}]$ .

El montaje experimental creado muestra tener un comportamiento estable, donde los datos medidos presentan una tendencia muy similar a las curvas teóricas que caracterizan el comportamiento del diodo ideal. Los errores para los datos medidos de intensidad de corriente no superan el 6%, mientras el voltaje se mide con una incertidumbre menor al 4%. Se obtienen regresiones de las curvas características con coeficientes de determinación superiores a 0,91.

Se identifica como fuente de error el efecto de la acumulación y crecimiento de gotas en las paredes del recipiente contenedor. Este es medido en un espacio temporal de una hora, generando un breve aumento inicial de los valores medidos, seguido a una disminución paulatina. El error generado por este efecto no supera el 2% tanto para la intensidad de corriente, como para el voltaje.

Se estudia el efecto del recipiente contenedor de nubosidad, de donde es posible extraer las porciones de radiación reflejada y absorbida, estas corresponden a un 3,58% y 5,53% respectivamente.

La radiación percibida por la celda disminuye con el aumento de la distancia entre celda y nubosidad. Si bien la porción de radiación bloqueada muestra un aumento con esta distancia, este crecimiento tiende a un valor límite, cercano a un 15%, medido para una separación de 14,5 [cm]. El aumento en la distancia de la nubosidad a la celda se ve reflejado en un escalamiento de la curva característica IV, desplazándola hacia el origen sin alterar su forma.

Aumentos en el espesor nuboso utilizado generan decaimiento en la radiación percibida por la celda fotovoltaica. Se obtiene que la radiación bloqueada aumenta desde un 4,95% para un espesor de 4 [cm], hasta un 51,73% para un espesor de 16 [cm]. Se genera un desplazamiento de la curva característica IV de la celda hacia el origen, donde el valor de  $I_{sc}$  disminuye en mayor medida que  $V_{oc}$ , por lo que se aprecia un cambio en la forma de la curva característica, a diferencia del caso de desplazamiento nuboso.

No es posible establecer una tendencia clara entre el espesor de la nubosidad y la absorción de radiación, se requiere el estudio de una mayor cantidad de casos para abordar esta relación con precisión.

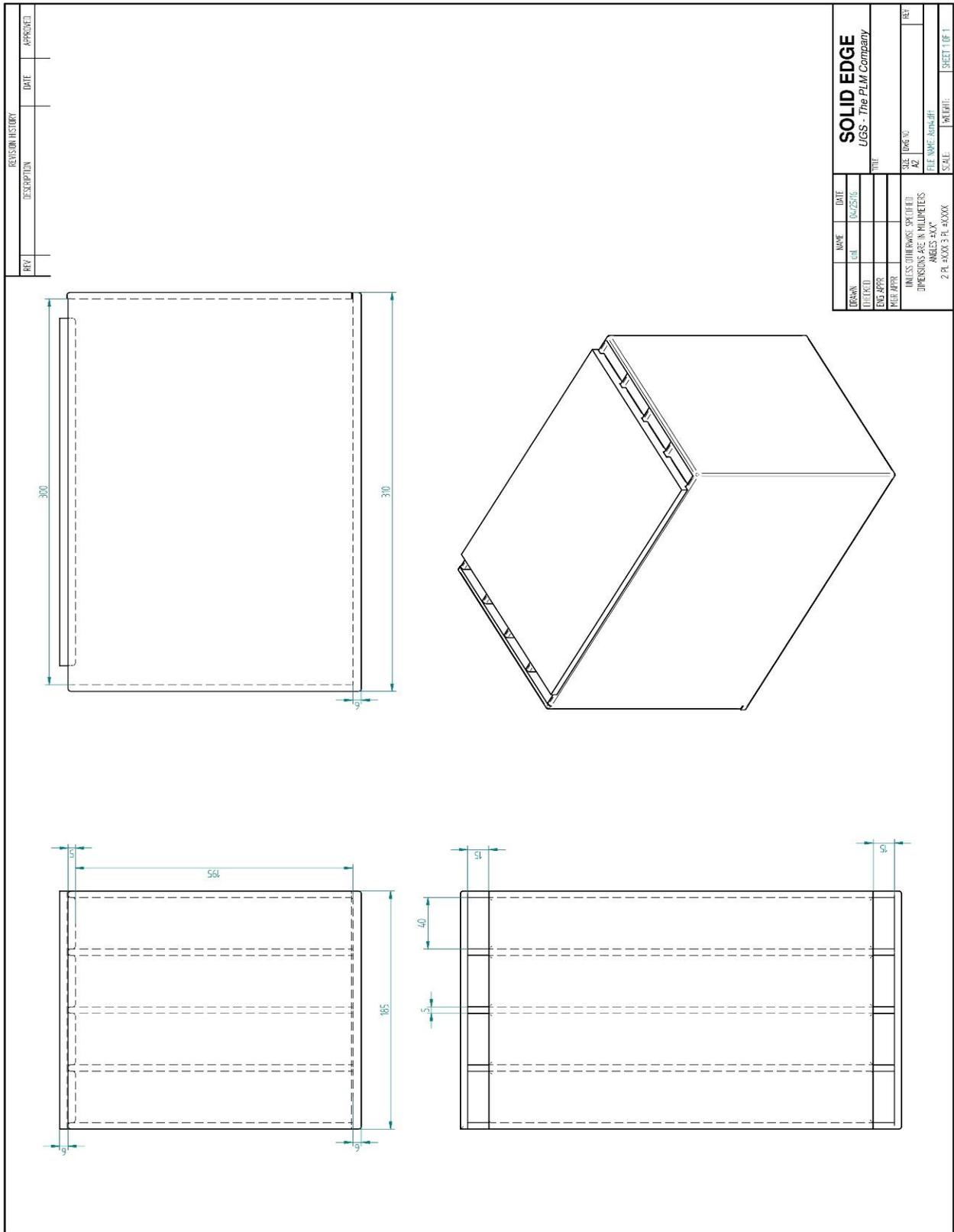
## Bibliografía

- [1] IEA, International Energy Agency, *Technology Roadmap: Solar photovoltaic energy*, Paris, 2010.
- [2] C. Santana O., *Energías renovables en Chile, el potencial eólico, solar e hidroeléctrico de Arica a Chiloé.*, Santiago, 2014.
- [3] E. B.V., *International Geophysics*, 2da edición, 2014, p. 47–76.
- [4] *Directiva 1999/30/CE del Consejo de 22 de abril de 1999 relativa a los valores límite de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, partículas y Pb en el aire ambiente.*, 1999.
- [5] S. Chandrasekhar, *Radiative Transfer*, Oxford, 1950.
- [6] G. Yamamoto, *Direct absorption of solar radiation by atmospheric water vapor, carbon dioxide and molecular oxygen.*, 1962, p. 182–188.
- [7] C. O. B. a. L. W. Rigollier, *On the clear sky model of the ESRA —European Solar Radiation Atlas—with respect to the Heliosat method*, *Solar energy*, 2000, p. 33–48.
- [8] R. a. R. H. Bird, *Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces*, Golden, Colorado, 1981.
- [9] J. Tarpley, *Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data.*, 1979, p. 1172–1181.
- [10] C. G. D. a. S. M. Gautier, *Simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data*, 1980, p. 1005–1012.
- [11] K. Coulson, *Characteristics of the radiation emerging from the top of a Rayleigh atmosphere II: Total upward flux and albedo*, *Planetary and Space Science*, 1959, p. 277–284.
- [12] L. M. K. Sze S. M., « *Semiconductor Devices Physics and Technology*, » 3ra edición., Taiwan, 2010, pp. 15-56.
- [13] «PVEDucation,» [En línea]. Available: <http://pveducation.org/sites/default/files/PVCDROM/PN-Junction/Images/BOND-SI.GIF>. [Último acceso: 12 Junio 2016].
- [14] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*, Londres, 2003, pp. 17-176.
- [15] «PVEDucation,» [En línea]. Available: [http://pveducation.org/pvcdrom/types-of-recombination#footnote2\\_uu4x68x](http://pveducation.org/pvcdrom/types-of-recombination#footnote2_uu4x68x). [Último acceso: 12 Junio 2016].
- [16] «PVEDucation,» [En línea]. Available: <http://pveducation.org/sites/default/files/>

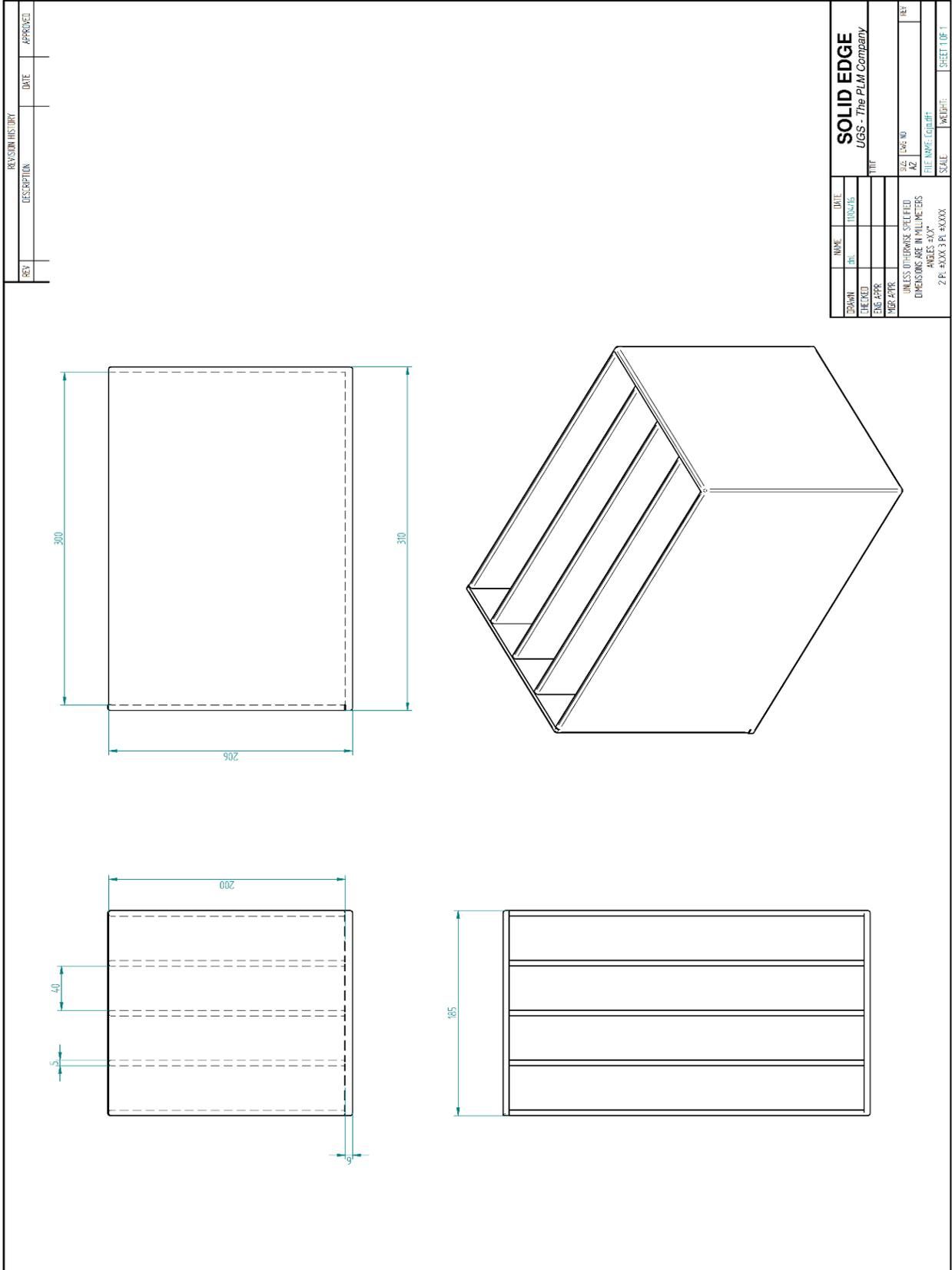
- PVCDROM/Solar-Cell-Operation/Images/SRREAL.gif. [Último acceso: 20 Octubre 2016].
- [17] «Monografías,» [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos82/energia-solar-fotovoltaica-y-sus-aplicaciones/image044.png>. [Último acceso: 12 Junio 2016].
- [18] «PVLighthouse,» [En línea]. Available: [https://www2.pvlighthouse.com.au/resources/courses/altermatt/The%20Solar%20Spectrum/The%20global%20standard%20spectrum%20\(AM1-5g\).aspx](https://www2.pvlighthouse.com.au/resources/courses/altermatt/The%20Solar%20Spectrum/The%20global%20standard%20spectrum%20(AM1-5g).aspx). [Último acceso: 5 Octubre 2016].
- [19] B. R. O. Díaz V. S., «Acondicionamiento térmico de edificios,» 1ra edición ed., Buenos Aires, 2005, pp. 63-69.
- [20] G. M. Masters, «Olino,» 2004. [En línea]. Available: <http://www.olino.org/wp-content/uploads/2011>. [Último acceso: 15 Septiembre 2016].
- [21] «Photonstartechnology,» [En línea]. Available: [www.photonstartechnology.com/learn/how\\_leds\\_produce\\_white\\_light](http://www.photonstartechnology.com/learn/how_leds_produce_white_light). [Último acceso: 7 Octubre 2016].
- [22] «Lighting with a new light source,» *ETAP NV*, 6ta edición, Noviembre 2015.
- [23] D. A. H. Hidalgo, «Optimización de un sistema fotovoltaico de un vehículo con tracción eléctrica,» Santiago de Chile, 2012.

# Anexo A: Plano del recipiente contenedor

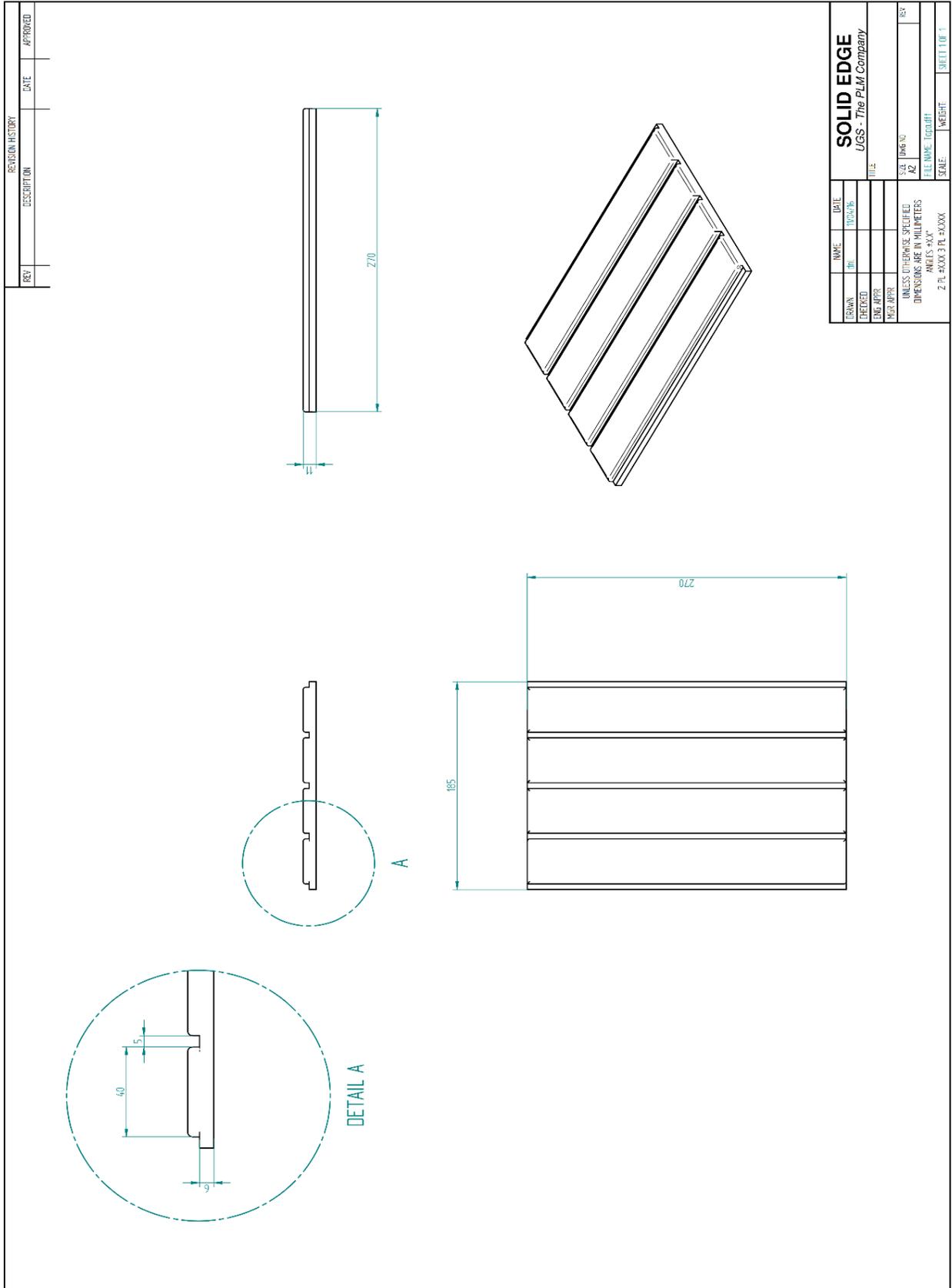
## Plano de conjunto



# Plano de cuerpo principal



# Plano de tapa



## Anexo B: Datos Medidos

### Caso 1

Intensidad de corriente			Voltaje [v]		
[ $\mu$ A]					
Imin [ $\mu$ A]	Imax [ $\mu$ A]				
0	0	8,65	173	175	6,51
5	5	8,61	177	179	6,44
6	6	8,6	189	191	6,17
10	10	8,57	198	200	5,99
11	11	8,55	199	201	5,95
15	15	8,51	210	212	5,74
19	19	8,48	209	215	5,65
24	24	8,43	218	224	5,4
25	25	8,42	223	229	5,22
28	28	8,4	228	234	5,09
33	33	8,35	228	236	5,05
35	35	8,33	235	243	4,87
37	37	8,31	240	248	4,62
47	47	8,23	243	251	4,55
54	54	8,15	250	258	4,36
55	55	8,13	252	260	4,25
56	56	8,12	257	265	4,09
59	59	8,11	260	268	3,97
68	68	8,02	263	266	3,82
70	70	7,99	266	269	3,65
72	72	7,98	270	278	3,5
74	74	7,94	272	280	3,41
76	76	7,92	277	285	3,13
77	77	7,91	279	289	2,94
91	91	7,76	283	293	2,8
104	104	7,61	284	294	2,68
118	118	7,43	287	297	2,57
123	123	7,36	287	299	2,49
132	132	7,25	289	301	2,46
146	146	7,02	293	305	2,45
157	157	6,89	295	304	2,44
158	158	6,84	296	305	2,42
163	163,5	6,71	299	307	2,37
			303	311	2,2
			324	336	0

## Caso 2

Intensidad de corriente [ $\mu\text{A}$ ]		Voltaje [v]			
Imin [ $\mu\text{A}$ ]	Imax [ $\mu\text{A}$ ]				
0	0	7,36	135	139	3,8
0	0	7,36	137	142	3,73
0	0	7,36	138	143	3,65
0	0	7,35	138	144	3,62
7	7	7,29	140	145	3,58
8	8	7,26	142	147	3,49
10	10	7,21	145	150	3,37
13	13	7,15	148	154	3,19
17	17	7,09	148	155	3,15
20	20	7,02	149	157	3,09
28	28	6,9	151	157	3,04
33	33	6,81	152	158	3,01
39	39	6,71	154	160	2,98
42	43	6,63	155	161	2,86
48	49	6,5	156	163	2,81
57	58	6,29	158	165	2,73
65	66	6,1	158	165	2,69
70	73	5,93	160	166	2,68
78	78	5,81	162	170	2,5
86	88	5,56	165	171	2,37
92	94	5,41	166	173	2,31
98	100	5,19	168	175	2,19
101	104	5,09	172	180	1,95
101	106	5,01	173	180	1,88
104	107	4,98	175	182	1,81
109	112	4,83	177	185	1,65
110	113	4,87	177	186	1,59
112	115	4,71	178	188	1,56
115	118	4,63	187	190	1,5
118	122	4,46	188	191	1,46
119	123	4,41	189	193	1,42
122	126	4,35	190	193	1,39
124	128	4,25	191	195	1,35
129	133	4,05	199	213	0
132	136	3,94	198	212	0
133	136	3,91	199	210	0
			199	210	0
			197	209	0

### Caso 3.1000

Intensidad de corriente			Voltaje [v]		
[ $\mu\text{A}$ ]					
Imin [ $\mu\text{A}$ ]	Imax [ $\mu\text{A}$ ]				
0	0	6,98	111	114	4,56
0	0	6,96	115	118	4,37
0	0	6,95	116	121	4,32
0	0	6,97	117	122	4,27
0	0	6,96	122	127	4,11
7	7	6,89	124	129	3,99
5	5	6,84	127	132	3,91
7	7	6,8	130	136	3,73
10	10	6,78	132	138	3,65
13	13	6,75	137	143	3,46
17	17	6,69	142	148	3,19
19	19	6,66	143	150	3,14
26	26	6,6	144	151	3,1
32	33	6,49	145	152	3,05
36	36	6,38	147	155	2,86
42	42	6,27	150	157	2,77
45	46	6,28	153	160	2,6
48	48	6,22	156	164	2,43
53	54	6,06	158	166	2,31
57	58	6,08	159	166	2,26
58	59	6,02	160	169	2,15
59	60	5,95	161	170	2,02
67	68	5,71	162	171	1,83
75	76	5,57	164	173	1,77
78	82	5,49	166	174	1,72
79	81	5,45	167	175	1,66
85	87	5,27	167	178	1,57
91	93	5,17	169	179	1,51
97	100	4,97	173	181	1,46
99	102	4,82	173	183	1,43
102	106	4,73	173	184	1,42
104	109	4,67	190	200	0
107	111	4,61	189	205	0
			188	202	0
			190	203	0
			190	202	0

Caso 3.1100

Intensidad de corriente			71	72	5,02
[ $\mu\text{A}$ ]		Voltaje [v]	72	75	5,01
Imin [ $\mu\text{A}$ ]	Imax [ $\mu\text{A}$ ]		75	78	4,9
0	0	6,76	78	81	4,82
0	0	6,75	81	85	4,7
0	0	6,76	85	86	4,54
0	0	6,74	89	92	4,52
0	0	6,75	92	96	4,29
0	0	6,75	96	101	4,16
5	5	6,72	97	103	4,12
6	6	6,7	106	109	3,97
7	7	6,69	108	112	3,85
8	8	6,66	109	114	3,78
9	9	6,63	113	119	3,63
10	10	6,6	118	126	3,44
12	12	6,68	123	131	3,22
13	13	6,5	123	132	3,18
14	14	6,48	125	134	3,11
16	16	6,45	126	132	2,97
17	17	6,42	131	140	2,72
18	18	6,39	135	143	2,59
20	20	6,33	137	144	2,3
21	21	6,31	140	151	2,21
24	24	6,24	145	153	2,1
25	25	6,2	152	159	1,74
29	29	6,16	154	163	1,67
34	34	6,02	159	170	1,2
42	42	5,87	160	171	1,2
44	44	5,85	162	171	1,19
45	45	5,81	163	172	1,2
47	48	5,75	173	184	0
48	49	5,72	173	185	0
51	53	5,61	172	183	0
56	57	5,51	173	185	0
61	62	5,33	170	182	0
68	70	5,15	173	185	0

### Caso 3.1110

Intensidad de corriente			Voltaje [v]		
[ $\mu\text{A}$ ]					
Imin [ $\mu\text{A}$ ]	Imax [ $\mu\text{A}$ ]				
0	0	6,43	109	118	2,52
0	0	6,44	109	120	2,4
0	0	6,42	111	122	2,29
0	0	6,4	113	122	2,18
0	0	6,42	113	124	2,09
10	10	6,13	118	130	2,02
18	18	5,89	116	129	1,98
19	19	5,84	121	129	1,91
22	22	5,73	123	133	1,69
28	28	5,65	124	136	1,66
34	34	5,44	126	137	1,62
39	40	5,38	127	139	1,52
40	44	5,19	124	138	1,47
45	46	5,12	126	137	1,39
46	49	5,08	126	138	1,37
49	50	5,04	129	142	1,32
51	53	4,99	136	149	1,22
54	56	4,9	138	144	1,18
55	57	4,82	130	143	1,09
59	60	4,73	129	146	1,08
63	68	4,52	126	148	1,04
66	69	4,43	131	142	1
68	71	4,38	130	144	1,02
71	73	4,31	130	141	0,97
73	76	4,25	130	143	0,9
74	77	4,17	130	143	0,88
78	78	4,09	130	144	0,87
79	82	4,03	131	145	0,86
88	96	3,57	131	145	0,86
96	103	3,09	129	144	0,87
98	107	2,96	153	167	0
102	112	2,71	152	165	0
106	114	2,67	150	166	0
108	115	2,58	152	165	0

### Caso 3.1111

Intensidad de corriente [ $\mu\text{A}$ ]			Voltaje [v]		
Imin [ $\mu\text{A}$ ]	Imax [ $\mu\text{A}$ ]				
0	0	6,1	60	68	3,14
0	0	6,05	67	71	3,06
0	0	6,07	67	70	2,97
0	0	6,05	69	74	2,88
0	0	6,03	69	76	2,73
4	4	5,86	71	77	2,55
6	6	5,77	73	78	2,38
7	8	5,72	75	80	2,2
10	11	5,64	77	83	2,1
13	14	5,46	78	82	1,97
18	20	5,25	79	84	1,8
22	25	5,13	80	86	1,75
27	29	4,92	80	86	1,68
32	35	4,78	81	88	1,66
36	38	4,58	93	89	1,58
37	44	4,46	84	93	1,54
39	45	4,43	85	93	1,46
40	45	4,28	88	97	1,34
42	47	4,21	89	92	1,26
44	49	4,06	91	92	1,23
46	50	4,03	91	93	1,21
45	50	3,91	91	96	1,15
47	51	3,76	92	97	0,99
48	51	3,69	92	97	0,98
49	61	3,61	92	97	0,98
50	61	3,55	92	97	0,97
50	63	3,47	93	98	0,95
53	64	3,35	94	105	0
54	66	3,32	94	105	0
55	66	3,32	94	105	0

### Caso 3.0100

Intensidad de corriente [ $\mu\text{A}$ ]			Voltaje [v]		
Imin [ $\mu\text{A}$ ]	Imax [ $\mu\text{A}$ ]				
0	0	6,3	108	111	4,35
0	0	6,7	112	115	4,17
0	0	6,6	112	117	4,13
0	0	6,6	113	118	4,08
0	0	6,5	118	123	3,94
4	4	6,28	120	125	3,83
4	6	6,27	123	128	3,76
6	7	6,25	125	131	3,59
10	11	6,22	127	133	3,52
13	13	6,2	132	138	3,34
17	18	6,15	137	142	3,08
19	20	6,08	137	144	3,04
26	27	6,1	138	145	3,01
32	33	6	139	146	2,96
36	37	6,05	141	149	2,79
42	43	5,82	144	150	2,7
44	45	5,83	146	153	2,54
47	48	5,78	149	157	2,37
52	53	5,64	151	159	2,26
56	57	5,67	152	158	2,21
57	56	5,63	152	161	2,12
58	59	5,57	153	162	1,99
66	67	5,35	154	163	1,8
74	75	5,23	156	164	1,75
76	80	5,16	158	165	1,7
77	79	5,13	158	166	1,65
83	85	4,97	158	169	1,56
89	91	4,88	160	169	1,48
95	98	4,7	164	171	1,42
97	99	4,56	163	173	1,41
99	103	4,49	167	170	1,38
101	106	4,44	181	193	0
104	108	4,38	180	195	0
			180	194	0
			179	193	0
			179	194	0

### Caso 3.0010

Intensidad de corriente [ $\mu\text{A}$ ]			Voltaje [v]			
Imin [ $\mu\text{A}$ ]	Imax [ $\mu\text{A}$ ]					
0	0	6,3	106	109	4,24	
0	0	6,43	110	113	4,06	
0	0	6,35	110	115	4,02	
0	0	6,4	111	115	3,98	
0	0	6,42	115	120	3,84	
3	5	6,11	117	122	3,73	
5	5	6,07	120	125	3,67	
7	7	6,04	122	128	3,5	
10	10	6,04	124	130	3,43	
13	13	6,02	129	135	3,26	
17	17	5,98	133	138	3	
19	19	5,96	133	140	2,97	
26	26	5,92	134	141	2,94	
32	33	5,83	135	142	2,89	
36	36	5,74	137	145	2,72	
42	42	5,65	140	146	2,64	
44	45	5,66	142	148	2,48	
47	47	5,62	144	152	2,31	
52	53	5,48	146	154	2,21	
55	56	5,51	147	153	2,16	
56	57	5,47	147	156	2,07	
57	58	5,42	148	157	1,94	
65	66	5,2	149	158	1,76	
73	74	5,09	151	158	1,71	
75	79	5,02	153	159	1,66	
76	78	4,99	152	160	1,61	
82	84	4,84	152	163	1,53	
88	90	4,75	154	163	1,47	
93	96	4,57	158	165	1,42	
95	97	4,44	157	166	1,39	
97	101	4,37	161	163	1,35	
99	104	4,32	176	184	0	
102	106	4,27	175	183	0	
			175	185	0	
			174	183	0	
			173	184	0	

### Caso 3.0001

Intensidad de corriente [ $\mu\text{A}$ ]			Voltaje [v]		
Imin [ $\mu\text{A}$ ]	Imax [ $\mu\text{A}$ ]				
0	0	6,3	117	122	3,84
0	0	6,43	119	124	3,73
0	0	6,35	122	127	3,67
0	0	6,4	124	130	3,5
0	0	6,42	126	132	3,43
7	7	6,11	131	137	3,26
5	5	6,07	135	140	3
7	7	6,04	135	142	2,97
10	10	6,04	136	143	2,94
11	13	6,02	137	144	2,89
15	17	5,98	139	147	2,72
17	19	5,96	142	148	2,64
26	26	5,92	144	150	2,48
29	33	5,83	146	154	2,31
33	36	5,74	148	156	2,21
40	42	5,65	149	155	2,16
41	45	5,66	151	158	2,07
45	47	5,62	150	159	1,94
50	53	5,48	151	160	1,76
53	56	5,51	153	160	1,71
54	57	5,47	153	161	1,66
55	58	5,42	152	162	1,61
64	66	5,2	154	165	1,53
71	74	5,09	156	165	1,47
76	79	5,02	160	161	1,42
76	78	4,99	157	163	1,39
80	84	4,84	158	163	1,31
86	90	4,75	170	180	0
92	96	4,57	169	178	0
93	97	4,44	170	179	0
97	101	4,37	172	182	0
99	104	4,32	170	179	0
102	106	4,27			
106	109	4,24			
112	115	4,06			
112	117	4,02			
113	117	3,98			