



*"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"*

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISION DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ELECTRÓNICA

Efecto superficial de un recubrimiento basado en nanopartículas de silicio sobre una celda solar para la mejora de su eficiencia

TESIS PRESENTADA POR:

Ing. Juan Antonio Martínez Zamora

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN ELECTRÓNICA

DIRECTOR DE TESIS: Dra. Alicia Vera Marquina

CODIRECTOR DE TESIS: Dr. Antonio Ramos Carrazco

Hermosillo, Sonora

24 de junio del 2022

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Índice

Agradecimientos.....	4
Dedicatoria.....	5
Índice de figuras	6
Índice de tablas.....	8
Resumen.....	9
Abstract.....	10
1. Introducción.....	11
1.1. Antecedentes	11
1.2. Hipótesis	12
1.3. Justificación	13
1.4. Objetivo General.....	13
1.5. Contenido de la tesis.....	14
2. Marco Teórico.....	15
2.1. Celdas Solares.....	15
2.1.1. Modelo de una celda solar	15
2.1.2. Curvas Corriente-Voltaje y Potencia-Voltaje	17
2.1.3. Clasificación de celdas solares	20
2.2. Recubrimientos en celdas solares.....	27
2.2.1. Recubrimientos antirreflejantes.....	27
2.2.2. Recubrimientos de conversión descendente	29
2.3. Recubrimiento de conversión descendente basado en NPsSi	31
2.3.1. Propiedades ópticas.....	31
2.3.2. Métodos de síntesis	32
3. Desarrollo Experimental.....	35
3.1. Síntesis de nanopartículas de silicio	35
3.2. Caracterización de las NPsSi	36
3.2.1. Dispersión Dinámica de Luz (DLS).....	37
3.2.2. Espectroscopía Ultravioleta-Visible (UV-Vis).....	38

3.2.3.	Fotoluminiscencia (PL).....	39
3.2.4.	Microscopía electrónica de transmisión (TEM).....	41
3.3.	Mejora del depósito de NPsSi por el método de spin coating.....	41
3.4.	Caracterización eléctrica de celdas solares.....	49
3.4.1.	Curvas I-V y P-V.....	50
3.4.2.	Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	52
4.	Análisis y discusión de resultados	53
4.1.	Tamaño promedio de las NPsSi.....	53
4.1.1.	Resultados DLS.....	53
4.1.2.	Resultados TEM.....	55
4.2.	Estimación del ancho de banda prohibida y el método de Tauc.....	60
4.3.	Fotoluminiscencia de las NPsSi.....	62
4.4.	Microscopía electrónica de barrido (SEM) de celdas solares.....	63
4.5.	Caracterización eléctrica de celdas solares.....	64
5.	Conclusiones	77
6.	Trabajo a futuro	79
7.	Productos	81
8.	Referencias	83

Agradecimientos

A los cracks: Roberto, Ángel, Víctor y Gerardo, por todas las veces que contaron su vida, las risas, pedas y buenos momentos dentro y fuera del laboratorio.

Se recordarán siempre: el metalorgánico que se fue, la espada de silicio: Excalibur, el sensor de gases que no sensaba, los cuarzos rotos y mi resistencia negativa.

También a Miguel, hijo de Múzquiz, heredero de electrónica, amo y señor de los nanofabos, ensenadense honorario, jefe de jefes topolobampenses señores, conquistador de roomies, usurpador de camas individuales y dama de honor.

A mi madrina, Karime y mi tío Joaquín, por su apoyo incondicional, sus consejos tanto académicos como de vida y por haberme dado asilo, trabajo y raite cuando más lo necesité.

A los doctores: Alicia Vera Marquina, Antonio Ramos Carrazco y Dainet Berman Mendoza, por haberme apoyado en cada momento, por brindarme su opinión profesional y abrirme sus puertas no solo con la relación de profesor-alumno, sino con la de un amigo.

A la Universidad de Sonora (UNISON) y al Laboratorio de Nanofabricación (NanoFab), por la formación que recibí y por haber brindado sus establecimientos y equipo necesarios para realizar este estudio.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su apoyo económico, el cual hizo posible mi estadía durante el tiempo de maestría.

Dedicatoria

A mi madre, Danitza.

Cuéntame, ¿Cómo se siente tener 2 tesis dedicadas?

A mi hermanos: Danitza, Lorena y Adrián.

Por favor no se torturen como yo escribiendo una tesis. Graduarse por promedio está infravalorado y deberían de hacerlo si tienen la oportunidad.*

To world domINAtion



**Not only did I author a thesis once, but twice. This masochistic behavior should not be taken as an example.*

Índice de figuras

2.1: Circuito equivalente de una celda solar.....	15
2.2: Circuito equivalente de una celda solar ideal.....	16
2.3: Curvas I-V (rojo) y P-V (negro) con los parámetros de las celdas solares.....	18
2.4: Diagrama de la estructura de una celda solar de silicio.....	21
2.5: Estructura de la celda solar CIGS diseñada por Nakamura et al.....	23
2.6: Estructura típica de una celda solar CdTe.....	24
2.7: Estructura típica de una celda solar de tipo tándem.....	26
3.1 Proceso de la reacción utilizada para la síntesis de NPsSi.....	36
3.2: Diagrama esquemático del sistema de caracterización por DLS.....	37
3.3: Diagrama esquemático del sistema de caracterización por UV-Vis.....	39
3.4: Diagrama esquemático del sistema de caracterización por PL.....	40
3.5: a) Primer prototipo impreso; b) Versión 1.3 del prototipo impreso.....	42
3.6: a) Versión 1.3 de la base de jeringa y palanca; b) Versión 2.0 de la base de jeringa y palanca.....	43
3.7: a) Versión 1.3 de la palanca; b) Versión 2.0 de la palanca.....	44
3.8: Rediseño de la placa.....	44
3.9: a) Vista frontal del prototipo; b) Vista isométrica del prototipo.....	45
3.10: Prototipo impreso.....	45
3.11: Ensamblaje del sistema	46
3.12: Sistema terminado. Se muestran el controlador del sistema, el spin coater con el dispensador y el agitador magnético con un matraz de NPsSi.....	47
3.13: Diagrama de flujo del programa del sistema.....	48
3.14: Diseño de soporte.....	51
3.15: Equipo Keithley 4200A-SCS.....	52
4.1: Mediciones de DLS de la muestra T de NPsSi.....	54
4.2: Imágenes TEM de la muestra T de NPsSi.....	56
4.3: Análisis de las imágenes TEM de la muestra T de NPsSi para el primer plano obtenido.....	57
4.4: Análisis de las imágenes TEM de la muestra T de NPsSi para el segundo plano obtenido.....	58
4.5: Análisis de las imágenes TEM de la muestra T de NPsSi para otra NPs capturada.....	59
4.6: Análisis de las imágenes TEM de la muestra T de NPsSi, segundo plano obtenido.....	59
4.7: Absorbancia para la muestra de NPs T.....	61
4.8: Ancho de banda prohibida determinado para la muestra de NPs T.....	62
4.9: Mediciones de fotoluminiscencia de la muestra T de NPsSi.....	63

4.10: Mediciones de SEM; a) y b) Son una CS sin recubrimiento; c) es una CS con NPs Si, se pueden ver los puntos que las representan; d) y e) Son una CS con NPsSi depositadas; f) Es una ampliación de la CS con el recubrimiento, se pueden observar los puntos blancos que representan las NPsSi.....	64
4.11: Medición de la curva I-V de la muestra J5 con y sin NPsSi, con tratamiento térmico.....	67
4.12: Medición de la curva P-V de la muestra J5 con y sin NPsSi, con tratamiento térmico.....	68
4.13: Medición de la curva I-V de la muestra J6 con y sin NPsSi, sin tratamiento térmico.....	68
4.14: Medición de la curva P-V de la muestra J6 con y sin NPsSi, sin tratamiento térmico.....	69
4.15: Medición de la curva I-V de la muestra J7 con y sin NPsSi, con tratamiento térmico.....	70
4.16: Medición de la curva P-V de la muestra J7 con y sin NPsSi, con tratamiento térmico.....	71
4.17: Medición de la curva I-V de la muestra J8 con y sin NPsSi, con tratamiento térmico.....	71
4.18: Medición de la curva P-V de la muestra J8 con y sin NPsSi, sin tratamiento térmico.....	72
4.19: a) Medición de las curvas I-V; b) Medición de la curva P-V. Ambas de la muestra C4.....	74
4.20: Medición de la curva I-V de la muestra C4 con las capas 12 a la 15.....	75
4.21: Medición de la curva P-V de la muestra C4 con las capas 12 a la 15.....	75

Índice de tablas

Tabla 2.1: Dimensiones de libertad según el tipo de estructura.....	29
Tabla 3.1: Parámetros de síntesis.....	35
Tabla3.2: Parámetros de incorporación.....	48
Tabla 4.1: Resultados de los anillos de las imágenes SAED.....	59
Tabla 4.2: Medición de curva I-V de la muestra J7 sin NPsSi.....	64
Tabla 4.3: Medición de curva I-V de la muestra J5 y J6 con y sin NPsSi.....	68
Tabla 4.4: Medición de curva I-V de la muestra J7 y J8 con y sin NPsSi.....	71
Tabla 4.5: Mediciones de las curvas I-V de la muestra C4 con y sin NPsSi.....	75

Resumen

Este trabajo busca generar conocimientos en el proceso de síntesis de nanopartículas de silicio (NPsSi), por el método de un solo paso (one-step). A través de una metodología controlada, se busca mejorar la incorporación de NPsSi como recubrimiento de conversión descendente, sobre celdas solares de silicio policristalino.

Esto se logrará por medio del control de la velocidad de goteo con la cual se depositan las nanopartículas, el volumen de agua en donde se encuentran suspendidas las NPsSi y la velocidad de giro de un spin-coater, sobre el cual estará colocada la celda solar (CS) a recubrir, esto con el objetivo de mejorar la eficiencia de conversión.

Para garantizar que el resultando mejorará las características de las celdas solares, las NPsSi se caracterizarán por medio de los métodos de: dispersión dinámica de luz (DLS¹), espectroscopía UV-Vis, microscopía electrónica de transmisión (TEM¹) y fotoluminiscencia (PL¹). Mientras que las CS con el recubrimiento serán caracterizadas por microscopía electrónica de barrido (SEM¹) se obtendrán sus curvas I-V y P-V para medir su factor de llenado y eficiencia.

¹ Por sus siglas en inglés

Abstract

This work seeks to generate knowledge in the process of synthesis of silicon nanoparticles (NPsSi), by the one-step method. Through a controlled methodology, it is sought to improve the incorporation of NPsSi as a downshifting coating on polycrystalline silicon solar cells. It will be achieved by controlling the dripping speed with which the nanoparticles are deposited, the volume of water where they are suspended, and the speed of rotation of a spin-coater where the solar cells (CS) are placed in order to be coated; All this with the aim of improving the conversion efficiency.

To guarantee that the result will improve the characteristics of the solar cells, the NPsSi will be characterized by means of the dynamic light scattering method (DLS) while for the CS with the coating its I-V, P-V and C-V curves will be obtained.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Ante las problemáticas de desabasto de energía, eficiencia de conversión y el cuidado del medio ambiente, las energías renovables han captado el interés de la comunidad científica, provocando un crecimiento en el número de trabajos dedicados a su estudio. De entre todas las energías renovables disponibles, la solar es una de las más utilizadas, debido a su fácil acceso y abundancia en casi todo el mundo, su aprovechamiento se hace por medio de dispositivos capaces de convertir la energía solar en energía eléctrica las llamadas celdas solares (CS).

La primer celda solar de estado sólido fue creada por Charles Fritts en 1883. Estaba formada por una capa de selenio semiconductor cubierta con una capa delgada de oro para formar las uniones, este dispositivo tuvo una eficiencia de alrededor del 1%. Sin embargo, no fue hasta 1941 con la invención de la celda solar de silicio por parte de Russel Ohl, que las celdas solares comenzaron a tener relevancia en el área de producción de energía, alcanzando eficiencias de alrededor del 20% para la década de los ochentas [1], [2].

Desde que se comenzó la comercialización de celdas solares como fuente de energía renovable, la investigación en torno a ellas se ha centrado en la mejora de su eficiencia pues, aún en día suele estar por debajo del 30% [3]. Como solución para esto, algunos autores se centran en el desarrollo y la búsqueda de nuevos materiales, tratamiento de superficies y el apilamiento de diferentes capas semiconductoras. Algunos ejemplos, son las celdas solares orgánicas o de polímeros, las de multi-unión, las que utilizan cubiertas antirreflejantes de nanopartículas (NPs), etc.

Cada una de las modificaciones que se le pueden hacer a la celda tendrá un impacto en la eficiencia y, específicamente hablando del caso de recubrimientos antirreflejantes, algunas investigaciones han conseguido mejoras absolutas experimentales de hasta 3.7% [4]–[8].

Los recubrimientos antirreflejantes pueden estar fabricados con NPs, las cuales son aglomeraciones de átomos con escalas entre 1 y 100 nm aproximadamente. Estas escalas a las cuáles se encuentran, permiten que los materiales presenten alteraciones en sus propiedades, algunas de ellas son debido a que el tamaño de la nanopartícula limita la movilidad de los electrones por medio de un fenómeno conocido como confinamiento cuántico [9].

Gracias a este fenómeno, las NPs tienen una interacción particular con la luz solar, pues son capaces de producir un mecanismo de conversión descendente o *downshifting* (por su nombre en inglés), el cual produce la absorción de fotones de alta energía, que después son liberados como fotones con una energía menor [10]. Este fenómeno es de suma importancia para los recubrimientos con los cuales se buscan cubrir las CS, debido a que permite que la celda convierta mayores cantidades de luz de onda corta (300-500 nm) en energía eléctrica, en lugar de desperdiciarlos, debido a que dicha energía antes se encontraba fuera de su rango de absorción [11].

Las NPsSi, además de presentar el fenómeno de conversión descendente, se pueden sintetizar por medio de un método simple, ecológico y de bajo costo de producción llamado proceso de un solo paso o *one-step process* (por su nombre en inglés) el cual se realiza por medio de la mezcla de dos sustancias, una que funge como fuente de materiales, conocida como base y otra sustancia que cumple la función de reductor, mediante la ruptura de los enlaces de la base para liberar el material de interés, es decir, silicio [12], [13]. Todos los factores antes mencionados hacen de las NPsSi sólidas, candidatas para la mejora de la eficiencia de celdas solares, validando la viabilidad de este proyecto.

1.2. Hipótesis

Se logrará incrementar la eficiencia de celdas solares de silicio policristalino mediante un control preciso del depósito de un recubrimiento de conversión descendente basado en NPsSi.

1.3. Justificación

Hoy en día existen muchos métodos con los cuales es posible sintetizar nanopartículas de silicio, ya sean por rutas físicas o químicas, estas últimas son capaces de producir un mayor número de NPsSi que los métodos físicos y no requieren del uso de láseres o electrodos con alta corriente [14], [15]. Dentro del grupo de métodos químicos se encuentra el proceso de un solo paso, el cual además de no requerir equipo altamente especializado para su realización, no produce residuos tóxicos y tiene un costo extremadamente bajo, por lo cual es un proceso ideal para la producción de las NPsSi [16].

Se ha demostrado que aplicar recubrimientos antirreflejantes con base de nanopartículas de silicio sobre celdas solares de silicio policristalino mejora la eficiencia de conversión de energía que presentan. Tomando esto como base, se busca controlar el proceso de incorporación de tal forma que la densidad de NPsSi en el recubrimiento aumente, con el objetivo de que la eficiencia de la celda también se vea beneficiada.

1.4. Objetivo General

Desarrollar un método confiable para la incorporación de NPsSi como recubrimiento de conversión descendente sobre celdas solares de silicio policristalino con el objetivo de incrementar su eficiencia.

Objetivos específicos

- Identificar los principales parámetros que interfieren en el método de incorporación de las NPsSi en la CS.

- Establecer un método controlado para el recubrimiento uniforme de NPsSi sobre celdas solares.
- Realizar un diseño de experimentos para obtener diferentes recubrimientos de conversión descendente.
- Caracterizar las NPsSi por dispersión dinámica de luz (DLS), espectroscopía UV-Vis (UV-Vis), fotoluminiscencia (PL) y microscopía electrónica de transmisión (TEM).
- Caracterizar las celdas solares por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM) así como la obtención de sus curvas I-V y P-V.

1.5. Contenido de la tesis

Los capítulos de esta tesis están organizados de la siguiente manera:

El Capítulo 1 está dedicado a introducir y justificar el interés por realizar el estudio así como las bases que lo sustentan.

El Capítulo 2, aborda el tema de celdas solares; explica su funcionamiento, sus generaciones y los recubrimientos que pueden utilizar para mejorar sus características.

El Capítulo 3, expone los tipos de caracterizaciones que se realizaron para analizar el recubrimiento y las celdas solares.

El Capítulo 4, presenta los resultados obtenidos de caracterizar las muestras, además, incluye una discusión de ellos y los compara con los reportados por diferentes estudios.

El Capítulo 5, contiene las conclusiones a las que se llegaron con el estudio. También se incluye un listado de las referencias utilizadas.

2. Marco Teórico

Este capítulo se enfoca en la descripción de las celdas solares, es decir, los diferentes tipos y formas de recubrirlas, así como los parámetros para sintetizar nanopartículas de silicio, con el objetivo de definir los fundamentos de este estudio y por qué se utilizó el recubrimiento antirreflejante de conversión descendente, basado en nanopartículas de silicio.

2.1. Celdas Solares

Las celdas solares o celdas fotovoltaicas son dispositivos semiconductores capaces de convertir energía solar en energía eléctrica por medio del efecto fotovoltaico sin ninguna clase de intervención mecánica. Este proceso físico consiste en la excitación de los electrones que poseen los átomos del semiconductor con el cual fue fabricada la celda solar (generalmente silicio) en su capa de valencia por medio de los fotones que posee la luz solar, esto produce una corriente eléctrica que las CS transportan por medio de la diferencia de potencial que generan para ser almacenada [17].

Es importante recalcar que no todos los fotones que inciden sobre las CS son capaces de excitar a los electrones, la longitud de onda necesaria está ligada al ancho de banda prohibida del material; Estos fotones con energías menores al ancho de banda prohibida son reflejados por la celda o convertidos en calor, teniendo un efecto negativo en la eficiencia de la celda solar [18].

2.1.1. Modelo de una celda solar

Se puede modelar el comportamiento de una celda solar por medio de un circuito equivalente llamado “Modelo de 1 diodo” también conocido como “Modelo de desempeño fotovoltaico de 5 parámetros”, lo anterior porque

contiene 5 parámetros independientes en su circuito equivalente: corriente máxima (I_{max}), voltaje máximo (V_{max}), corriente de corto circuito (I_{sc}), voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y los coeficientes de temperatura de la corriente de corto circuito ($\alpha_{I_{sc}}$) y voltaje de circuito abierto ($\beta_{V_{oc}}$) [19], [20].

Este modelo se muestra en la figura 2.1 y consiste en un diodo real, que representa la unión p-n de la celda solar, en paralelo con una fuente de corriente ideal que suplende de corriente al diodo, dependiendo del flujo de energía solar que incide sobre la CS. Además de esto, para tener una representación más exacta del comportamiento real de la celda, se agregan una resistencia de derivación (R_p) en paralelo al diodo, que representa las pérdidas tanto superficiales como las debidas a efectos cristalinicos que tiene la celda; y una resistencia en serie (R_s) que representa la resistencia del semiconductor más la resistencia que los contactos poseen en la unión entre la celda y sus cables conductores.

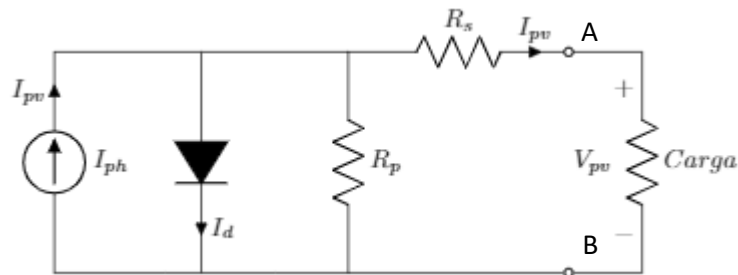


Figura 2.1: Circuito equivalente de una celda solar.

Como ya se mencionó antes, las resistencias en serie (R_s) y paralelo (R_p) agregadas al modelo de la celda solar representan las pérdidas que tiene la CS en diferentes áreas, si se observa el circuito de la figura 2.1 es posible deducir que, si la resistencia en serie disminuyera su valor hasta cero y la resistencia en paralelo aumentara su valor hasta infinito, se tendría el circuito equivalente de una celda solar ideal, como se ve en la figura 2.2.

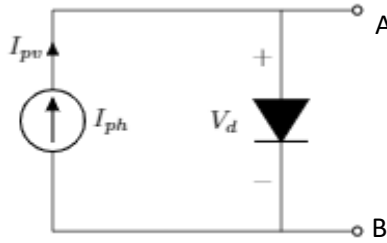


Figura 2.2: Circuito equivalente de una celda solar ideal.

Si se analiza el circuito de la figura 2.2, existen dos situaciones importantes que darán como resultado la mayor corriente y voltaje que puede proporcionar el modelo. La primera de ellas es cuando se juntan las terminales A-B, provocando un corto circuito que da lugar a un voltaje del diodo (V_d) nulo. Dada la baja resistencia que ofrece el corto circuito en comparación con el diodo, toda la corriente producida por la fuente de corriente ideal (I_{ph}) fluye a través de él, dicha corriente toma el nombre de corriente de corto circuito (I_{sc}). Ahora bien, si las terminales A-B se dejan sin conectar se tiene un circuito abierto, lo cual provoca que la corriente sea cero y, por lo tanto, el voltaje del diodo (V_d) se convierte en el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) [21].

2.1.2. Curvas Corriente-Voltaje y Potencia-Voltaje

Existen diferentes parámetros que ayudan a medir la calidad de una celda solar, casi todos los más importantes se pueden obtener con dos gráficas, la primera llamada curva I-V (figura 2.3), que está conformada por la corriente que genera la celda con respecto al voltaje y con una irradiancia de 100 mW/cm^2 equivalente a 1 KW/m^2 cuando se trabaja con el espectro global AM1.5 establecido por el estándar internacional ISO 9845-1 de 1992 [22]. Por otra parte, la segunda se llama curva P-V (ver figura 2.3), que se obtiene al graficar la potencia contra el voltaje de la CS.

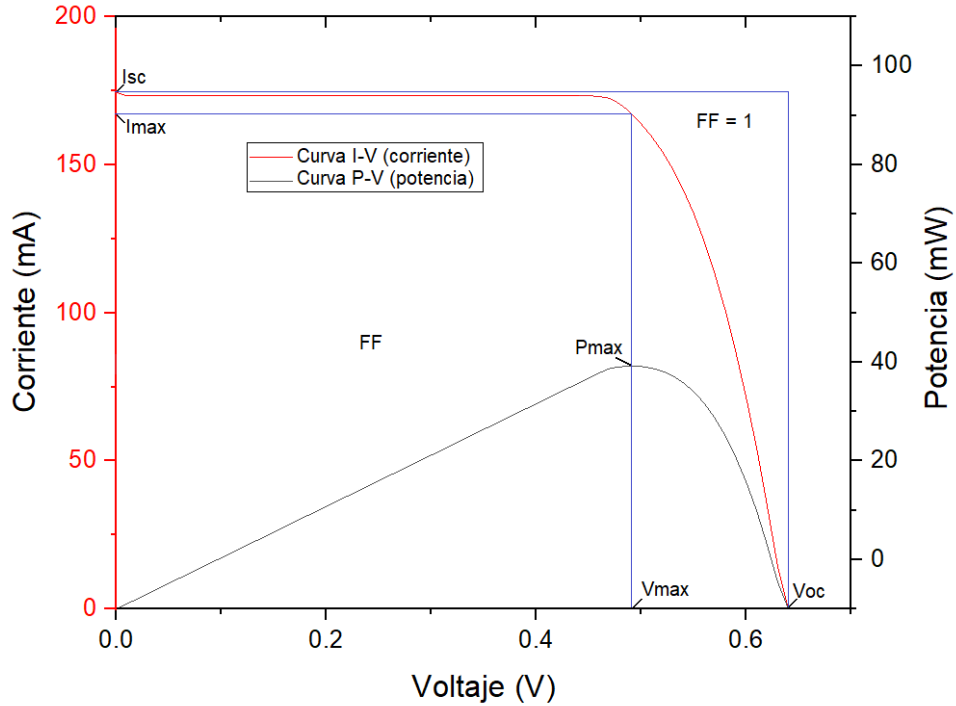


Figura 2.3: Curvas I-V (rojo) y P-V (negro) con los parámetros de las celdas solares.

Con la información que brindan estas curvas se pueden encontrar diferentes parámetros, ya sea de manera gráfica (figura 2.3), o de manera matemática. Los parámetros más importantes son:

1. Corriente de corto circuito (I_{sc}): es la corriente máxima que la CS es capaz de producir, se encuentra en el cruce por el eje “y” de la corriente de la curva I-V, es decir, cuando el voltaje de la CS es igual a 0, dando lugar a un corto circuito [23], [24]. Este parámetro es dependiente del área de la celda (A), en caso de querer eliminar dicha dependencia, se puede obtener la densidad de corriente de corto circuito (J_{sc}) mediante:

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{A} \quad (E2.1)$$

2. Voltaje de circuito abierto (V_{oc}): es el voltaje máximo que la CS es capaz de producir, se encuentra en el cruce por el eje “x” de la corriente de la curva I-V es

decir, cuando la corriente es igual a 0, lo que tiene como resultado un circuito abierto. Corresponde a la cantidad de polarización directa en la celda solar debido a la polarización de la unión de la celda solar con la corriente generada por la luz [25], [26].

3. Potencia máxima (P_{max}): es la máxima potencia que la CS es capaz de entregar. Se obtiene multiplicando todos los valores de corriente con sus respectivos valores de voltaje, donde se tiene la mayor cantidad de mW, está la potencia máxima. Gráficamente es la cresta de la curva P-V.
4. Voltaje máximo (V_{max}): este es el voltaje que la CS produce cuando su potencia es máxima. Es el valor que tiene el eje "x" en las coordenadas de la potencia máxima (P_{max}).
5. Corriente máxima (I_{max}): esta es la corriente que la CS produce cuando su potencia es máxima. Si se extiende una recta paralela al eje "y" desde el valor del voltaje máximo (V_{max}), el cruce con la curva I-V es la corriente máxima, equivalente al valor del eje "y" en ese punto.
6. Factor de llenado (FF; derivado de Fill Factor): este parámetro mide qué tan "ideal" es la celda. Gráficamente se obtiene al comparar las áreas rectangulares conformadas por las coordenadas de I_{sc} - V_{oc} y las de I_{max} - V_{max} , donde el área mayor siempre es la del rectángulo I_{sc} - V_{oc} . Esto implica que su máximo es menor que 1. En la figura 2.3 se puede observar cuál sería el área del FF en caso de tener un valor de 1, correspondiendo a las coordenadas del rectángulo I_{sc} - V_{oc} . Matemáticamente se obtiene de la siguiente manera:

$$FF = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (E2.2)$$

donde:

I_{max} = Corriente máxima de la CS

V_{max} = Voltaje máximo de la CS

I_{sc} = Corriente de corto circuito de la CS

V_{oc} = Voltaje de circuito abierto de la CS

7. Eficiencia (η): es la relación de conversión que posee la CS entre la potencia que se le incide con respecto a la que entrega [27]. Entre mayor sea, mejor. Se mide en porcentaje y los valores típicos son de menos del 30%. Se calcula de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} * 100\% = \frac{P_{max}}{A * 100 \frac{mW}{cm^2}} * 100\% \quad (E2.3)$$

donde:

P_{max} = Potencia máxima que la celda produce

P_{in} = Potencia incidente sobre la celda

A = Área de la celda solar

2.1.3. Clasificación de celdas solares

Actualmente, las celdas solares se dividen en cuatro generaciones dependiendo del tiempo y los tipos de materiales que son utilizados en su fabricación. La primera generación comenzó con el invento de la celda solar de silicio en 1941 por Russel Ohl mediante una unión de silicio tipo p y tipo n (ver figura 2.4). Son las más utilizadas, teniendo una presencia en el mercado de alrededor del 73%, debido a la abundancia del silicio y a que poseen la mejor eficiencia en términos de una sola celda [28].

Funcionan de tal manera que cuando la luz solar incide sobre la CS, se crea una diferencia de potencial que permite el paso de los electrones entre la unión p-n, creando una fotocorriente que puede ser almacenada por baterías ubicadas como la carga del sistema. Sin embargo, no todos los fotones tienen la energía suficiente para excitar a los electrones y producir la fotocorriente, por ello existe un desperdicio de la energía solar menor al ancho de banda prohibida del material. Por otra parte, la celda desperdiciará parte de la energía de los fotones con energías mucha más grandes que el ancho de banda prohibida en forma de calor. Los dos fenómenos antes mencionados son los principales responsables de la pérdida de eficiencia de las CS de silicio. Esta generación comprende a las CS fabricadas a base de tres diferentes tipos de silicio :

- Silicio monocristalino: de los tres tipos de celdas que componen esta generación, ésta tiene las más eficientes, con razones de conversión máximas de aproximadamente $26\% \pm 1\%$ [2], [29], [30]. Sin embargo, el proceso mediante el cual se obtiene el silicio altamente puro, también conocido como Silicio de grado electrónico (EGS, por sus siglas en inglés), que se utiliza para producir estas celdas también las hace las más caras de las tres.

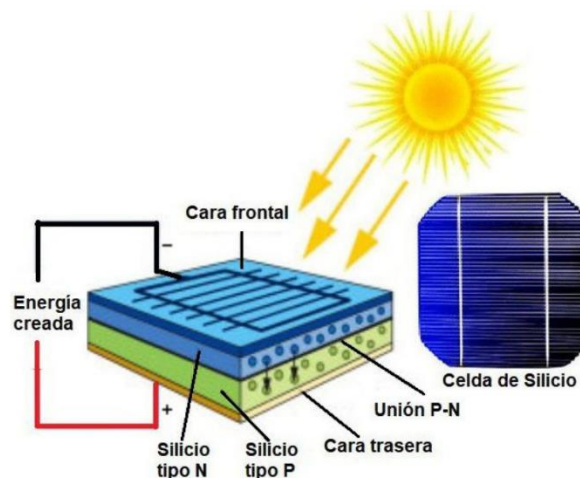


Figura 2.4: Diagrama de la estructura de una celda solar de silicio [31].

- Silicio policristalino: se trata de celdas fabricadas con un silicio menos puro y, por lo tanto, más barato. Este beneficio en el costo implica una eficiencia más baja que las CS de silicio monocristalino. Teniendo eficiencias máximas reportadas de aproximadamente 20% [32].
- Silicio amorfo: las celdas solares fabricadas con este material son más baratas que las anteriores pero menos eficientes. Están hechas con películas delgadas del material, no en forma cristalina y es por esta característica que se traslapan con la segunda generación de celdas solares. Teóricamente alcanzarían eficiencias del 15%, sin embargo, en la práctica se han reportado eficiencias máximas de $10.2\% \pm 0.3\%$ [33], [34].

La segunda generación de celdas solares está compuesta de películas delgadas, esta técnica se desarrolló para reducir el consumo de materiales en los procesos de fabricación así como los costos. Tienen una presencia en el mercado mundial del 10.4%, 7 veces menor que las CS de silicio [28]. Al igual que en la primera generación, existen, tres tipos principales:

- Silicio amorfo: es el más utilizado comercialmente debido a que los procesos de fabricación de celdas solares ya existentes pueden ser utilizados para fabricarlas. Sin embargo, como ya se comentó en la sección anterior, tienen varias desventajas con respecto a las celdas solares de silicio mono y policristalino.
- Cobre-Indio-Galio-diseleniuro (CIGS): las desventajas que presentaban las celdas de silicio amorfo llevaron al desarrollo de las CS de este tipo, teniendo la ventaja de que sus procesos de producción son más baratos que los de silicio amorfo. Este tipo de celdas posee la mayor eficiencia de los tres tipos de la segunda generación, con valores máximos de $23.35\% \pm 0.5\%$ [35].

La estructura básica de este tipo de celdas está formada por un sustrato de vidrio común, encima de este se depositan (en orden y una capa arriba de otra) una capa de molibdeno como contacto trasero, una capa de CIGS por medio de deposición física de vapor, una película delgada de CdS por medio de baño químico, una capa de ZnO como óxido conductor y, por último los contactos de Ni/Al (ver figura 2.5). Algunas veces se le deposita una capa antirreflejante de MgF_2 para aumentar la absorción de fotones [36]. En otras situaciones, como en el trabajo reportado por Nakamura et. al. se puede sustituir la capa de CdS por una capa doble de $Zn(O,S,OH)_x/Zn_{0.8}Mg_{0.2}O$ menos tóxica.



Figura 2.5: Estructura de la celda solar CIGS diseñada por Nakamura et al [35].

- Telurio de cadmio (CdTe): aunque este tipo de celdas presenta bajos costos de producción en comparación con las de silicio cristalino y eficiencias máximas del 22.1%, presentan una serie de desventajas que las hace una opción no tan atractiva para la industria, algunas de ellas son que los materiales para su fabricación se están convirtiendo en materiales raros y costoso, como el indio, o son altamente tóxicos, como el cadmio. Además, por la naturaleza de su proceso de producción, necesitan instalaciones especializadas [37–39].

La estructura de estas CS es muy similar a las CIGS como se muestra en la figura 2.6. Al igual que el CIGS, el CdTe se utiliza como la capa absorbente por su ancho de banda prohibida de 1.45eV.

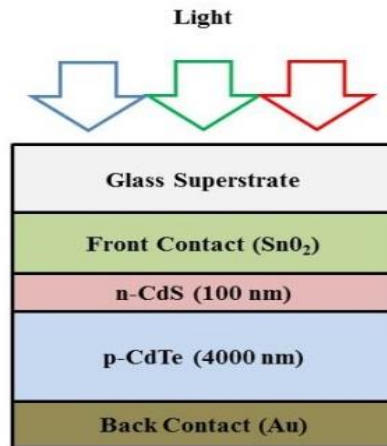


Figura 2.6: Estructura típica de una celda solar CdTe [40].

La tercera generación de celdas solares surgió debido a la búsqueda de una solución para los altos costos de la primera generación y la toxicidad de los materiales utilizados para la fabricación de las CS de la segunda. Esta generación y la cuarta representan el 15% del mercado mundial, sin embargo algunos estudios apuntan a que tendrán una presencia en el mercado del 44% para 2030 [28].

Además de lo anterior, otro de los principales problemas que buscaba dar solución esta generación de CS era al desperdicio de energía del cual sufren las celdas poseedoras de un solo ancho de banda prohibida, como las de silicio cristalino. Este desperdicio sucede con aquellos fotones con energías menores al ancho de banda prohibida no son capaces de excitar a los electrones de la CS; de manera similar, los fotones con energías mucho mayores que el ancho de banda prohibida se desperdician en forma de calor. Es por ello que, las CS de la tercera generación, a través de diversos métodos, buscaron la implementación de múltiples niveles de energía. Algunos ejemplos de las celdas pertenecientes a esta generación son:

- Celdas solares sensibilizadas con colorante (DSSC): Este tipo de celda solar de película delgada fue desarrollado por Michael Grätzel a finales de los ochenta. Tienen varias ventajas, como su simple método de fabricación, además es amigable con el medio ambiente si se utilizan colorantes naturales y su extremadamente bajo costo de producción de \$1 dólar/Watt_{pico}.

La eficiencia máxima reportada es del 11.9% ±0.4% para una sola celda, aunque para diferentes arreglos se tienen eficiencias variables, como es el caso del 8.8% de eficiencia reportado por Kawai para un arreglo de 26 celdas [41]–[43].

Su composición básica está formada por un núcleo poroso de nanopartículas TiO₂ (que han sido sintetizadas para establecer conducción electrónica), un colorante y un electrolito encapsulados por dos placas de vidrios transparentes de óxido conductor (TCO).

- Celdas solares orgánicas y de polímeros (OSC y PSC; respectivamente): Se caracterizan por estar formadas con estructuras de bicapas o heterouniones en bulto. Tal y como su nombre lo indica, la diferencia entre estas celdas radica en los materiales con los cuales son fabricadas, es decir polímeros o compuestos orgánicos; sin embargo, su funcionamiento base y estructura suelen ser iguales.

En las OSC/PSC con bicapas, la capa activa contiene materiales donadores, usualmente compuesto por moléculas ricas en electrones, y aceptores de altas capacidades. Estos materiales ayudan a la separación y transporte de cargas. Cuando la luz solar incide sobre la celda, se crean excitones en la parte del donador que después se trasladan hacia la interfaz donador-aceptor, donde intercambian lugares con los huecos, que se encuentran en la zona del aceptor, este movimiento de las cargas hacia los electrodos con polaridad contraria a la suya produce una fotocorriente y genera energía.

En este tipo de estructuras, los materiales tipo p y n se colocan unos sobre otros. Ahora bien, las OSC/PSC fabricadas a partir de heterouniones en bulto están formadas mediante la combinación en volumen de componentes donadores y aceptores resultando en pequeñas distancias de difusión en la interfaz donador-

aceptor. Su funcionamiento es muy similar al de las OSC/PSC con estructuras bicapas [44], [45].

Por último, se tienen las celdas solares de cuarta generación también conocidas como celdas solares de tipo tándem, estas celdas, como su nombre lo indica están compuestas por varias uniones p-n de celdas fabricadas con materiales capaces de absorber diferentes longitudes de onda, con el objetivo de aprovechar la mayor parte del espectro de luz visible.

La típica estructura de estas CS busca que la capa superior absorba las longitudes de onda menores es decir, con mayor energía, mientras que las capas inferiores absorban las longitudes de onda mayores que poseen una energía menor (ver figura 2.7). Tienen el mismo objetivo que la tercera generación, pues buscan lidiar con el problema de las pérdidas por el limitado rango de absorción y la termalización que tienen las celdas solares de un solo ancho de banda prohibida. Esta tecnología típicamente es fabricada con compuestos de elementos ubicados en los grupos III-V de la tabla periódica.

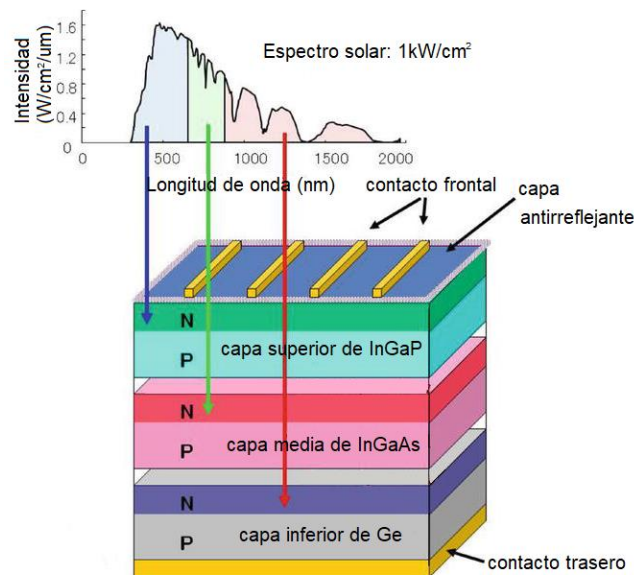


Figura 2.7: Estructura típica de una celda solar de tipo tándem [46].

Las CS basadas en Arseniuro de Galio (GaAs) son dispositivos multiunión capaces de producir las más altas razones de conversión de todos los tipos de CS

pues han registrado eficiencias tan altas como el 42.3% (a una concentración de 406 soles) reportado por Chiu et al y 45.6% (a una concentración de 1000 soles) de France et. al.; estas eficiencias han probado ser mucho mayores que las convencionales de silicio cristalino. Este tipo de CS tienen la capacidad de crecer tres o más uniones en una misma celda, típicamente las capas consisten en GaInP, GaInAs y Ge. Cada uno de los semiconductores utilizados en estos tipos tiene un ancho de banda diferente, lo que permite a la CS absorber diferentes longitudes de onda en cada capa [47]–[51].

2.2. Recubrimientos en celdas solares

Los recubrimientos son un elemento básico de toda celda solar, la mayoría de las celdas solares de silicio comerciales ya cuentan con su propio recubrimiento como capa antirreflejante con el fin de evitar el reflejo de la luz solar y disminuir la pérdida de eficiencia o protegerlas contra efectos físicos o químicos que podrían provocar fallos. Algunas de las mejoras que proveen estos recubrimientos son el incremento de su dureza para combatir las fracturas o brindar una mayor resistencia contra la radiación. Una de las características principales de un recubrimiento para CS es que son completamente, o casi, transparentes a la luz visible, para no afectar negativamente a la capacidad de la celda para absorber y transformar la energía solar.

2.2.1. Recubrimientos antirreflejantes

De todos los tipos de recubrimientos, los más populares son los antirreflejantes (del inglés *Anti-reflective coating*, ARC), por eso la gran cantidad de investigaciones dedicadas a ellos, tienen la función de prevenir el efecto de Fresnel,

es decir, las pérdidas por reflexión cuando la luz se propaga entre medios. El silicio cristalino tiene un índice de refracción (n) de 3.5, este provoca que entre 31-50% de la luz solar que incide sea reflejada por la superficie. Dicho efecto implica una indeseable pérdida de eficiencia [52], [53].

Existen dos principales enfoques para su fabricación: la primera a través de la incorporación de un índice de refracción graduado por medio de arreglos nanoestructurales y la segunda por medio del depósito de una o varias capas de películas delgadas sobre la CS; esta segunda opción es la más común y funciona con base en el principio de interferencia destructiva. Los recubrimientos a base de películas delgadas son fabricados con una gran variedad de materiales, algunos de ellos son el SiO_2 , TiO_2 , ZnO , entre otros.

- Dióxido de Silicio (SiO_2): se utiliza como ARC debido a su alta transparencia y baja absorción en las regiones del espectro visible y el infrarrojo cercano. Además de esto, también sirve para dar una mayor resistencia a la celda sobre la cual está depositado, debido a su alta resistencia a rayones y a que es químicamente estable a altas temperaturas.

Según un estudio realizado por Khuram et. al., al depositarse una capa de SiO_2 sobre una CS de silicio monocristalino, la reflectividad disminuyó del 31%-50% que suele tener el silicio a sólo un 15%. Representando un gran incremento en la luz absorbida por la celda y, por lo tanto incrementando su eficiencia [54].

- Dióxido de Titano (TiO_2): tiene un índice de refracción (n) de 2.5, que resulta apropiado para ser una capa antirreflejante en adición a esto, es transparente a en casi todo el espectro visible. También se caracteriza por tener una buena estabilidad química y una alta dureza mecánica que ayuda a contrarrestar la fragilidad de las CS [55].
- Óxido de Zinc (ZnO): este material cuenta con un índice de refracción (n) de aproximadamente 2 y un ancho de banda prohibida de 3.3eV, por lo que es apto

para utilizarse en CS de diferentes generaciones, como el caso de las CS de silicio cristalino y las DSSC. Se puede sintetizar por diferentes métodos, por ejemplo, sol-gel, evaporación térmica y depósito por vapor químico, evaporación por haz de electrones, entre otros. El método de sol-gel es el más utilizado, esto porque posee muchas ventajas, como su baja toxicidad, bajo costo y fácil implementación la producción de películas de alta calidad [56].

Las ARC fabricadas a base de ZnO son transparentes al espectro visible y poseen la característica de poder formar nanoestructuras para texturizar las capas. Dependiendo de las características de la nanoestructura que se haya formado, se podrá variar el valor del índice de refracción que posee la capa [57].

2.2.2. Recubrimientos de conversión descendente

Otro tipo de recubrimientos que se pueden utilizar en celdas solares son los de conversión descendente (DSC, del inglés Downshifting Coating). La investigación de estos recubrimientos se puede rastrear hasta finales de los 70s cuando Weber et. al. publicó su estudio sobre un colector de energía solar ecológico capaz de absorber la radiación solar de onda corta y reemitirla a una longitud de onda de mayor tamaño. En su publicación se reporta que este recubrimiento sería compatible con las celdas solares de silicio cristalino, que en esa época sufrían de un constante crecimiento tanto en desarrollo como en investigación [58].

Desde ese tiempo, los estudios dedicados a los DSC han descubierto y desarrollado toda clase de materiales capaces de producir este fenómeno y ayudar a la CS a mejorar su eficiencia. Algunos de los materiales capaces de producir este mecanismo son los recubrimientos de nanocristales de lantánidos; diferentes materiales luminiscentes (fósforos, colorantes orgánicos y nanopartículas), algunos oxisulfuros, entre otros [59], [60].

Esta clase de recubrimientos luminiscentes se colocan sobre la parte superior de la celda solar. Como su nombre lo indica, funcionan a base del mecanismo de downshifting, que consiste en la absorción de fotones con mayor energía (usualmente cercanos al ultravioleta) y su posterior reemisión como fotones de menor energía. Este fenómeno resulta en una mayor producción de pares electrón-hueco que al encontrarse dentro del espectro de absorción de las CS, en lugar de ser desperdiciados mediante termalización, son aprovechados y convertidos en fotocorriente, causando un aumento en la eficiencia de estos dispositivos fotovoltaicos.

El mecanismo de downshifting tiene base en el confinamiento cuántico, un fenómeno que se produce en estructuras cristalinas de semiconductores con distancias menores a 100 nm en una dirección, por lo que contienen entre 100 y 1000 átomos. Esta reducción de dimensiones lleva a un confinamiento de pares electrón-hueco llamados excitones, gracias a esto, se produce un cambio en las propiedades optoelectrónicas que tienen los materiales [61]. El confinamiento cuántico varía de material a material y suele depender del radio de Bohr (a_B), este radio es la distancia promedio que hay entre el núcleo de un átomo de hidrógeno y el nivel de energía menor donde se encuentra su único electrón, se trata de una constante física y tiene un valor de 5.29177×10^{-9} cm [62].

Existen tres tipos de estructuras cuánticas confinadas: pozos, hilos y puntos, en este último grupo se encuentran todas las nanopartículas fabricadas a base de semiconductores, como las de silicio. Cada una de estas estructuras confina a los excitones en una cierta cantidad de dimensiones, como se muestra en la tabla 2.1:

Estructura	Dimensiones de	
	confinamiento	libertad
Material en bulto	0D	3D
Pozos cuánticos	1D	2D
Hilos cuánticos	2D	1D
Puntos cuánticos	3D	0D

Tabla 2.1: Dimensiones de libertad según el tipo de estructura.

Este trabajo se centra en los puntos cuánticos o *quantum dots* de silicio fabricados por medio del proceso de un solo paso y depositados por el método de *spin coating*.

2.3. Recubrimiento de conversión descendente basado en NPsSi

El silicio es el segundo material más abundante en el planeta, tiene excelentes propiedades eléctricas y una baja toxicidad. En adición a esto, las nanoestructuras fabricadas con silicio también exhiben interesantes propiedades eléctricas, ópticas y mecánicas, por lo que se han utilizado en una gran cantidad de aplicaciones, ya sean biológicas como la imagenología de células vivas, entrega de medicamentos o terapia fotoinducida; en electrónica para la mejora de las baterías de iones de litio o la optoelectrónica como recubrimientos para celdas solares [63–65].

El desempeño de las NPsSi en esta última aplicación como recubrimiento es algo importante a destacar, pues se pueden sintetizar a través del método de un solo paso que permite la sintonización del tamaño lo que a su vez, da paso a la emisión de los 6 colores principales (rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta) según el diámetro que posea la nanopartícula. Dicha emisión es a través la conversión descendente.

2.3.1. Propiedades ópticas

Es innegable que, dentro de la industria de la microelectrónica, el silicio es el semiconductor de mayor importancia. En su forma cristalina se trata de un material

organizado con una estructura similar a la del diamante y con un parámetro de red de 0.543 nm. Esta estructura cristalina, junto con el tipo de enlace químico, tienen una gran importancia en la estructura de las bandas de energía del material.

Para el caso del silicio cristalino, el ancho de banda prohibida es del tipo indirecto; Esto implica que, durante la recombinación de pares electrón-hueco debe interferir un fonón. Sin embargo, para el caso de las NPsSi, el fonón no es necesario debido a las reducidas dimensiones, que dan la característica de un ancho de banda prohibida cuasi-directa. Como consecuencia, las NPsSi tienen un tiempo de radiactividad relativamente largo, ideal para aplicaciones como la imagenología de células vivas como lo reportan Zhong et al y Wang et al [16], [66], [67].

Otra propiedad importante que tienen las NPsSi es la capacidad de producir el fenómeno de confinamiento cuántico que les permite absorber luz. Esta absorción de fotones combinada con el mecanismo de *downshifting* (también desencadenado por el confinamiento cuántico) les posibilita la emisión luz. Así mismo, dicha luminosidad es sintonizable a diferentes longitudes de onda mediante la alteración del diámetro de los puntos cuánticos; entre más aumenta, su emisión se recorre hacia el rojo, mientras que si se disminuye, el espectro de la emisión se acercará al azul.

El ancho de banda prohibida cambia de manera inversamente proporcional al tamaño de la nanopartícula es decir, si el tamaño disminuye, el ancho de banda aumenta y viceversa. Es fácil deducir tomando en cuenta la naturaleza del mecanismo de *downshifting*; por ejemplo, las nanopartículas grandes que emiten en rojo absorbieron una longitud de onda menor al rojo, mientras que en nanopartículas pequeñas que emiten en azul, su absorción fue una longitud de onda en el violeta o UV cercano.

2.3.2. Métodos de síntesis

Existe una gran variedad de métodos por los cuales se pueden sintetizar las NPsSi, a grandes rasgos pueden ser clasificados en dos categorías: fase sólida y fase líquida. Los métodos sólidos suelen producir nanopartículas embebidas, mientras que los líquidos suelen producir soluciones coloidales con NPs en estado de suspensión. Algunos de los ejemplos de métodos de síntesis son:

- Síntesis por implantación de iones: la síntesis de NPsSi consiste en el bombardeo del objetivo por medio de iones para introducirlos en su red cristalina. El objetivo de esto es crear un exceso de silicio en la película para después recocer la película provocando la separación del exceso de silicio de la matriz, lo que resulta en un crecimiento de puntos cuánticos sobre la película. El recocido se suele hacer a temperaturas altas para poder reparar el daño en la película causado por la implantación de iones [68].

Un ejemplo de este método es publicado por Yedji et. al, que utilizó una oblea de silicio con una capa de dióxido de silicio como objetivo a la cual le implantó iones de Si^+ a una energía de 70 keV con flujos de 6×10^{16} , 1×10^{17} , 1.4×10^{17} y 2×10^{17} Si^+/cm^2 . Las obleas fueron después recocidas a temperaturas de 1100°C en nitrógeno por 15, 30 y 60 minutos para la nucleación de las NPsSi [69].

- Depósito por vapor químico mejorado por plasma (PECVD): en este método se crecen NPsSi embebidas sobre una capa de nitruro de silicio formada con precursores de silano y amonio o nitrógeno. Su funcionamiento consiste en la introducción de gases reactantes entre electrodos paralelos que, mediante su acople capacitivo excitan los gases, provocando una reacción química y, por consiguiente el depósito del producto sobre el sustrato [70].

Según lo reportado por Mon-Pérez et. al, su síntesis se puede realizar por medio del depósito de una capa de silano sobre un sustrato de silicio monocristalino con alta resistividad que se encuentra dentro de un reactor PECVD. Como gases precursores de dicloro silano, amoníaco, argón e hidrógeno. La temperatura, tiempo de depósito, potencia de la radiofrecuencia del plasma y la presión se

fijaron a 200°C, 30 minutos, 13.56MHz con una potencia de 30W y 500mTorr, respectivamente. Como resultado tuvo NPsSi con tamaños variando entre 2 y 5 nm, dependiendo de la concentración de enlaces Si-H y N-H [71].

- Síntesis por medio del método de un solo paso: este es de los procesos más simples para producir nanopartículas. Consiste en la combinación de una fuente de silicio, generalmente silanos como el APTMS y APTES, con un agente reductor, que puede variar entre ascorbato de sodio ($C_6H_7NaO_6$), citrato de sodio dihidrato ($C_6H_5Na_3O_7 \cdot 2H_2O$), ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$), etc. Todos los reactivos se encuentran diluidos en un medio acuoso, generalmente de agua desionizada.

El trabajo de Wu et. al. presenta NPsSi sintetizadas por medio de este método. Los reactivos que utilizaron fueron APTES 98% y ascorbato de sodio (AS); la síntesis se llevó a cabo a temperatura ambiente y con una disolución de 0.0594g de AS disuelto en 10ml de agua desionizada con aeración de nitrógeno durante 20 minutos para remover el oxígeno. Después extrajo 1.5ml de la solución anterior para mezclarlos con 1ml de APTES y 4ml de agua desionizada, acto seguido se agitaron magnéticamente a temperatura ambiente y presión atmosférica por 20 minutos. Diferentes muestras se guardaron por tiempos variables de 24 horas, 48 horas y 1 mes. Después de ello se caracterizaron, las nanopartículas con 1 mes de antigüedad presentaron fluorescencia de color azul en 365 nm por medio de excitación UV y un diámetro promedio de 3-4 nm [72].

3. Desarrollo Experimental

En este capítulo se describen las técnicas de caracterización empleadas en las nanopartículas y celdas solares utilizadas en el desarrollo de este estudio.

3.1. Síntesis de nanopartículas de silicio

Los precursores y materiales de laboratorio utilizados para la síntesis de las nanopartículas de silicio se listan a continuación:

- (+) L-ascorbato de Sodio (AS)
- (3-Aminopropyl) triethoxisilano (APTES)
- Agua desionizada
- Alcohol etílico
- Vasos de precipitado de 100 mL.
- Viales de 12 mL.
- Prototipo dispensador de nanopartículas.
- Spin Coater LaiZhou Weiyi VTC-50A.
- Agitador magnético.
- Balanza analítica Ohaus Pioneer PA224C

La síntesis de las NPsSi se realizó siguiendo el método de un solo paso a temperatura ambiente y presión atmosférica. Este método consiste en mezclar una disolución de 1 ml de APTES con 4 ml de agua desionizada, previamente agitada magnéticamente por 10 minutos, con una segunda disolución de 1.25 ml de agua desionizada con una concentración de 0.1 M de L-Ascorbato de Sodio. La solución formada con la combinación de ambas disoluciones anteriores se agita magnéticamente durante 20 minutos y después se deja reposar 24 horas para propiciar la formación de las NPsSi.

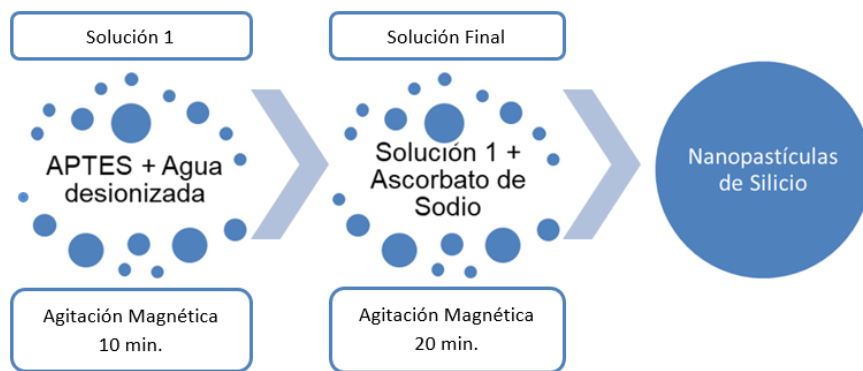


Figura 3.1 Proceso de la reacción utilizada para la síntesis de NPsSi.

Parámetro	Características	Cantidad
Fuente de silicio	APTES	1ml
Agente reductor	Ascorbato de sodio	1.25ml con concentración de 0.1M
Primer tiempo de mezcla	APTES + 4ml de agua	10 minutos
Segundo tiempo de mezcla	Ascorbato + APTES/agua	20 minutos

Tabla 3.1: Parámetros de síntesis.

3.2. Caracterización de las NPsSi

Con el objetivo de obtener las propiedades de las NPsSi éstas fueron caracterizadas por los métodos de dispersión dinámica de luz, espectroscopía UV-Vis, espectroscopía de fotoluminiscencia y microscopía electrónica de transmisión, que se encargan de brindar el tamaño, absorbancia, espectro de emisión y forma, respectivamente. En las siguientes secciones se describirán de manera más detallada.

3.2.1. Dispersión Dinámica de Luz (DLS).

También conocida como Espectroscopía de Correlación Fotónica (PCS), se utiliza para determinar el tamaño promedio de partículas suspendidas en un medio acuoso. Esto se logra creando una relación entre el tamaño de las partículas suspendidas y un movimiento térmico aleatorio que presentan, también llamado Browniano, el cual depende de su diámetro así como temperatura y viscosidad de la solución en la que se encuentran.

El arreglo que se utiliza para las mediciones de DLS consisten en un láser monocromático con un polarizador integrado y un fotomultiplicador con su respectivo polarizador a modo de detector, este elemento se encuentra en un ángulo (θ) de 90° con respecto al láser para evitar los efectos no lineales de la luz. El arreglo se muestra en la figura 3.2.

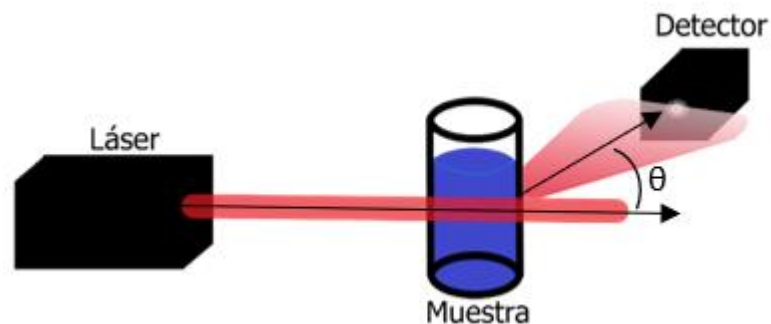


Figura 3.2: Diagrama esquemático del sistema de caracterización por DLS.

Las mediciones se realizan incidiendo la luz del láser sobre la muestra, las nanopartículas suspendidas en la solución causan dispersión en la luz que es captada por el fotomultiplicador, el cual la procesa y convierte en intensidad mediante su evaluación con respecto a una función de correlación, de tal forma que las variaciones de intensidad se transforman en variaciones de voltaje. Las partículas pequeñas provocarán mayores fluctuaciones de intensidad comparadas

con las grandes [73] [74]. La ecuación que se utiliza para convertir los datos adquiridos en la medición a tamaño de NPs se muestra a continuación:

$$d = \frac{kT}{3\pi\eta D_T} \quad (E 3.1)$$

donde:

d = *Diámetro de Stokes o hidrodinámico (diámetro de la nanopartícula)*

D_T = *Difusividad transversal relacionada con el diámetro de Stokes*

η = *Viscosidad del medio*

k = *Constante de Boltzmann*

T = *Temperatura absoluta*

La caracterización del tamaño de las NPsSi por el método de DLS fue realizada con equipo Zetasizer Nano ZS marca Malvern. Dada la importancia de la temperatura en este tipo de mediciones, es importante mencionar que la medición se realizó a presión constante y temperatura ambiente. Los datos obtenidos se procesaron con Origin 2019b.

3.2.2. Espectroscopía Ultravioleta-Visible (UV-Vis).

Es una técnica analítica simple y económica que mide la cantidad de longitudes de onda discretas de luz ultravioleta cercano (180–390 nm) y visible (390–780 nm) que son absorbidas o transmitidas a través de una muestra, en forma de disolución o fase gaseosa, en comparación con una referencia previamente medida [75]. Cuando la energía que poseen estas partes del espectro electromagnético interactúa con la muestra, provoca transiciones electrónicas y según la cantidad de radiación que es absorbida, se crea un espectro único para

cada compuesto, con el cual se puede determinar la composición y concentración del objeto de análisis en la solución [76].

Un arreglo simplificado de un equipo UV-Vis estaría compuesto por una fuente de luz, un monocromador y un detector como se muestra en la figura 3.3. El monocromador se encarga de separar y seleccionar las longitudes de onda de la fuente de luz para que pasen a través de la muestra que sólo absorberá ciertas longitudes de onda, dicha absorbancia es captada por el detector que tenía la información obtenida hacia una computadora para su extracción e interpretación.

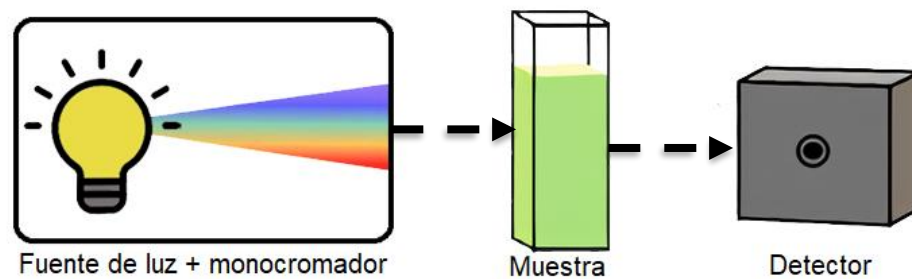


Figura 3.3: Diagrama esquemático del sistema de caracterización por UV-Vis.

La absorbancia de las NPsSi fue obtenida mediante un equipo de espectroscopia UV-Vis marca Thermo Fisher Scientific modelo Evolution 220 UV-Vis dentro del rango de longitudes de onda de 300 nm hasta 800 nm. Después, se procesaron las mediciones obtenidas por medio del método de Tauc y con un ajuste lineal se determinó su ancho de banda.

3.2.3. Fotoluminiscencia (PL).

Se trata de un tipo de caracterización que funciona a base de fluorescencia y fosforescencia, y sirve para caracterizar las propiedades optoelectrónicas de materiales semiconductores. Su funcionamiento se basa en una técnica no destructiva de radiación incidente sobre la muestra. Esta incidencia promueve la

generación de pares electrón-hueco para la posterior emisión de fotones por recombinación radiactiva.

Gracias a la naturaleza de este tipo de recombinación, es posible determinar los niveles de energía de las bandas u orbitales implicadas en ella mediante la energía fotónica del fotón emitido. Otras de las características electrónicas que se pueden obtener mediante PL son el ancho de banda prohibida directa y la brecha entre el orbital molecular ocupado más alto (HOMO) y el orbital molecular desocupado más bajo (LUMO) [75].

Mediante PL también es posible detectar impurezas presentes en semiconductores, donde la impureza detectada en la muestra será proporcional a la intensidad de la emisión radiactiva, que suele tener energías menores a la del ancho de banda prohibida. La luz emitida por la muestra se puede analizar por un monocromador de rejilla y ser detectada por un fotodetector [77].

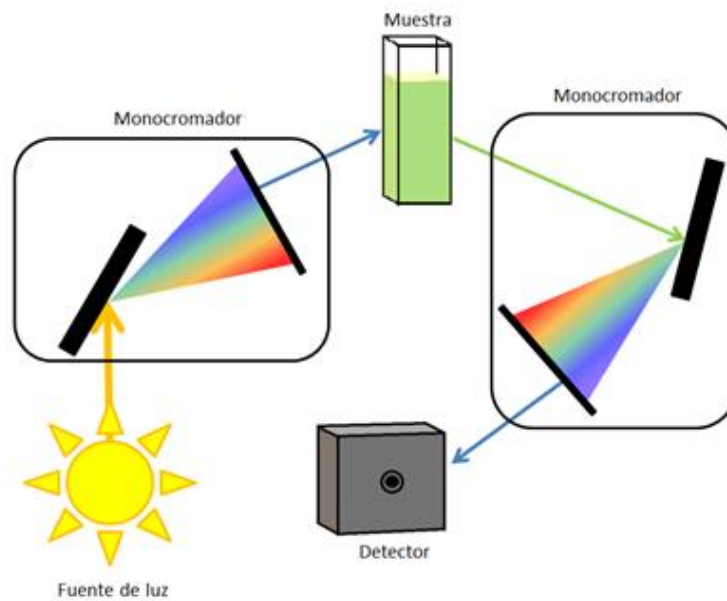


Figura 3.4: Diagrama esquemático del sistema de caracterización por PL.

Si bien el silicio es un semiconductor de ancho de banda prohibida de tipo indirecta, al tratarse con nanopartículas de silicio, la discretización de los niveles de energía provoca un cambio en esta característica, haciendo que se comporte como

un semiconductor con ancho de banda prohibida de tipo directa y, por ende, se puede estudiar por medio de esta caracterización [78].

Las nanopartículas de silicio sintetizadas fueron medidas con un láser marca Kimmon modelo IK Series He-Cd de 325 nm, un detector marca OceanOptics modelo Red Tide USB650 y el software OceanView Spectroscopy Software versión 1.6.7 propiedad de OceanOptics. Los datos fueron analizados y graficados por medio de Origin 2019b.

3.2.4. Microscopía electrónica de transmisión (TEM).

Es una técnica de caracterización que consiste en incidir un haz de electrones sobre una superficie determinada de la muestra. Aquellos electrones que se transmiten son redirigidos por un arreglo de lentes hacia un detector en paralelo, el haz captado sirve para determinar diferentes características de muestras sólidas o en suspensiones acuosas, tales como la estructura cristalina, dislocaciones en la estructura o el límite del grano para las primeras y estructura y forma para las segundas [79].

Dado que la energía necesita atravesar la muestra, las energías típicas del haz son de 80-300 keV sin embargo, los equipos TEM de alta resolución pueden llegar a tener energías de 1 MeV. Algunos parámetros importantes que afectan directamente el contraste de las imágenes TEM son la diferencia en la densidad de electrones de las estructuras en la muestra, el espesor y la densidad de la muestra, el diámetro del objetivo apertura, y en la energía de los electrones [80].

Si bien TEM se suele utilizar para sustratos sólidos, los equipos de alta resolución pueden obtener imágenes de nanopartículas, sin embargo, para lograr esto, es necesario que las nanopartículas sean colocadas sobre películas o redes. El equipo utilizado para este estudio fue un JEOL JEM2010 microscope.

3.3. Mejora del depósito de NPsSi por el método de spin coating

Para incorporación de las NPsSi por medio del método de spin coating fue necesario tener un control preciso de la cantidad y el tiempo de depósito de las NPsSi, por ello, a través de la herramienta CAD SolidWorks 2019 se realizó el diseño de un sistema capaz de dispensarlas a la velocidad deseada. El primer diseño impreso del prototipo se muestra en la figura 3.5 a).

Después de una evaluación del desempeño de la pieza que sirve como palanca para la jeringa (a través de la cual se dispensan las NPs) se propusieron mejoras a la estructura por lo que fue necesario implementar un nuevo diseño que tuvo como resultado la versión 1.3 mostrada en la figura 3.5 b). Esta versión posee una palanca 2.5cm más larga que la anterior para poder realizar todo el recorrido de los 5mL de la jeringa. Además, en la parte posterior a la muesca de la palanca donde se coloca la punta del émbolo de la jeringa, tiene una pequeña placa sostenida por un tornillo que brinda mayor solidez a la hora de transportar la jeringa, evitando falsos contactos o que se salga de lugar.

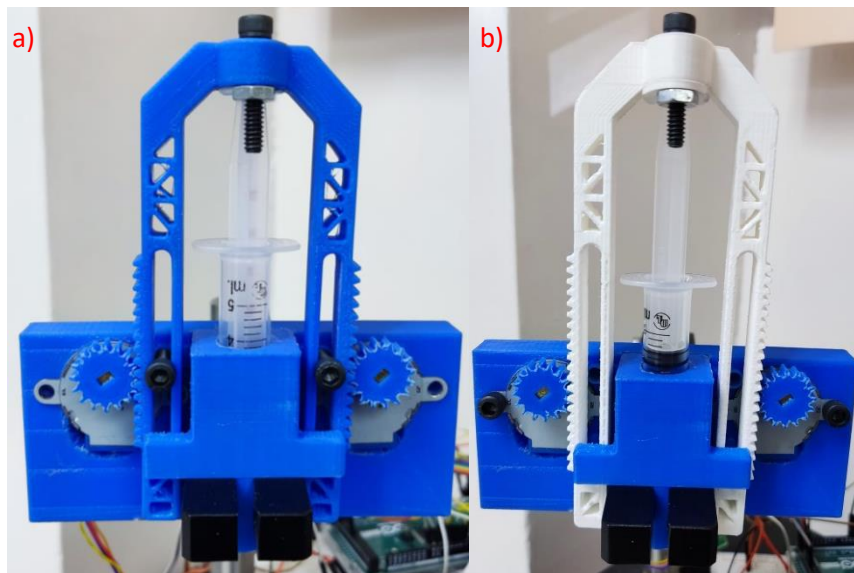


Figura 3.5: a) Primer prototipo impreso; b) Versión 1.3 del prototipo impreso.

Después de realizar pruebas con la versión 1.3, se descubrió que el deslizamiento de la palanca a medida que bajaba para dispensar las NPsSi no era uniforme, esto a causa del pobre confinamiento del cuerpo original del dispositivo,

por lo que, con el objetivo de corregir este error, se realizó un rediseño total del sistema. En la figura 3.6 a) se observa el diseño original de la versión 1.3 de la base de jeringa y palanca, es importante notar que sólo posee unas pequeñas protuberancias cuadradas para mantener en lugar la palanca y, si bien cumplían con su trabajo, no lo realizaban con la precisión deseada. Además de esto, debido al alto de las paredes, se tenía una gran dificultad al tratar de introducir la jeringa.

En contraste, el rediseño de la parte b) posee unas guardas que casi rodean por completo la palanca, implicando una mayor estabilidad al realizar ascensos o descensos. Adicionalmente, la pared frontal de la perforación donde se ubica la jeringa, fue recortada para introducir la jeringa con mayor facilidad y se le incluyó una perforación para un tornillo encargado de sujetar la jeringa en su lugar.

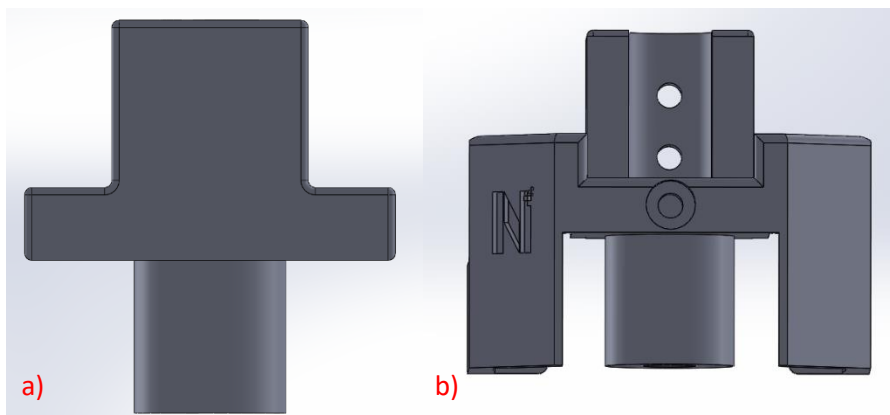


Figura 3.6: a) Versión 1.3 de la base de jeringa y palanca; b) Versión 2.0 de la base de jeringa y palanca.

Para poder ajustar la palanca a la nueva base, ésta fue rediseñada de tal forma que en lugar de utilizar las perforaciones para los tornillos de las versiones 1.1-1.3 que se pueden ver en la figura 3.7 a), se agregaron unas guías triangulares que embonan a la perfección con la base de las jeringas, brindando una mayor solidez en el movimiento horizontal, como se puede ver en la parte b) de la misma figura.

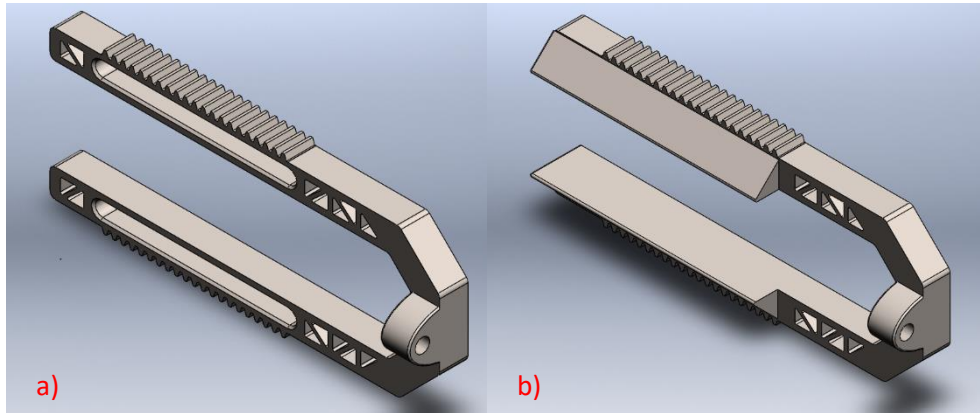


Figura 3.7: a) Versión 1.3 de la palanca; b) Versión 2.0 de la palanca.

Por último, la pequeña placa que antes sostenía la jeringa se rediseñó para que en lugar de tener a la tuerca suelta y debajo de ella, tuviera una muesca en la parte posterior donde fuera posible introducirla, facilitando el proceso de ajustar y soltar la jeringa de su posición. Su diseño se puede ver en la figura 3.8.

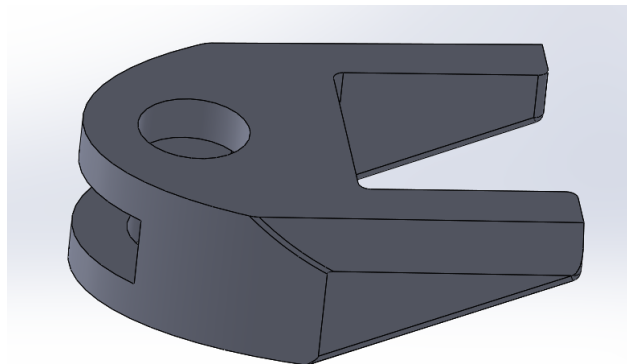


Figura 3.8: Rediseño de la placa.

Antes de imprimir las piezas, se realizó un ensamble en SolidWorks 2019 para revisar que todos los diseños no presentaran errores o inconsistencias y embonaran como fueron diseñados. Respecto a las partes del ensamble: los círculos rojos simulan los motores, los cilindros transparentes representan la jeringa y el rectángulo negro es la extensión del spin coater donde se coloca el sistema. El ensamble del nuevo prototipo se muestra en la figura 3.9.

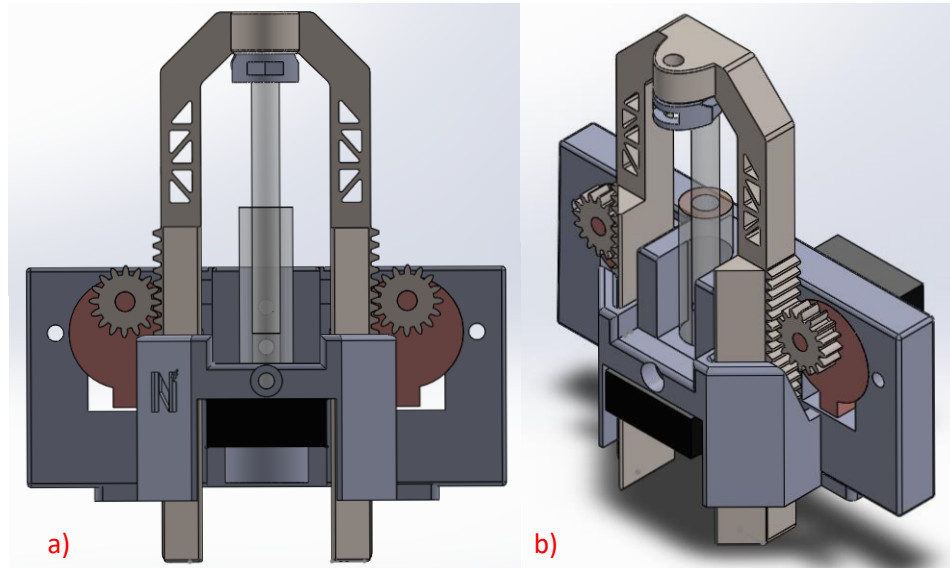


Figura 3.9: a) Vista frontal del prototipo; b) Vista isométrica del prototipo.

Una vez verificado esto, se imprimieron las piezas de la versión 2.0 y el resultado se puede observar en la figura 3.10.

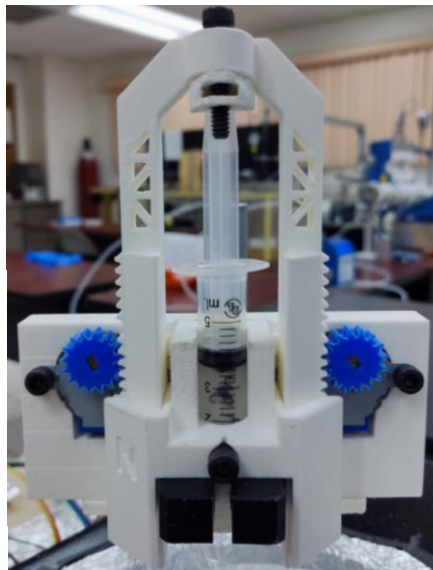


Figura 3.10: Prototipo impreso.

El control del dispositivo se lleva a cabo por medio de un arduino mega 2560 conectado hacia los motores y a dos pantallas, una de 32 segmentos (16x2) y otra LCD touch de 2.8". La pantalla touch se encarga de mostrar la interfaz gráfica de usuario y de recibir las entradas, es decir, en ella se seleccionan las velocidades y

se puede pausar, continuar o reiniciar el proceso de incorporación. Mientras que la pantalla de 32 segmentos muestra mensajes de estado, como pausa, ciclo actual y velocidad de depósito. Para evitar que se dañara el sistema de control y para contar con una mejor presentación del sistema, se diseñó un gabinete en solid works, el ensamblaje del gabinete con el dispensador se puede ver en la figura 3.11, mientras que el sistema armado se puede observar en la figura 3.12, mientras que en la figura 3.13 se muestra un diagrama de flujo del programa de control del sistema. Es importante mencionar que el sistema se encuentra bajo trámite de patente por la Unison.

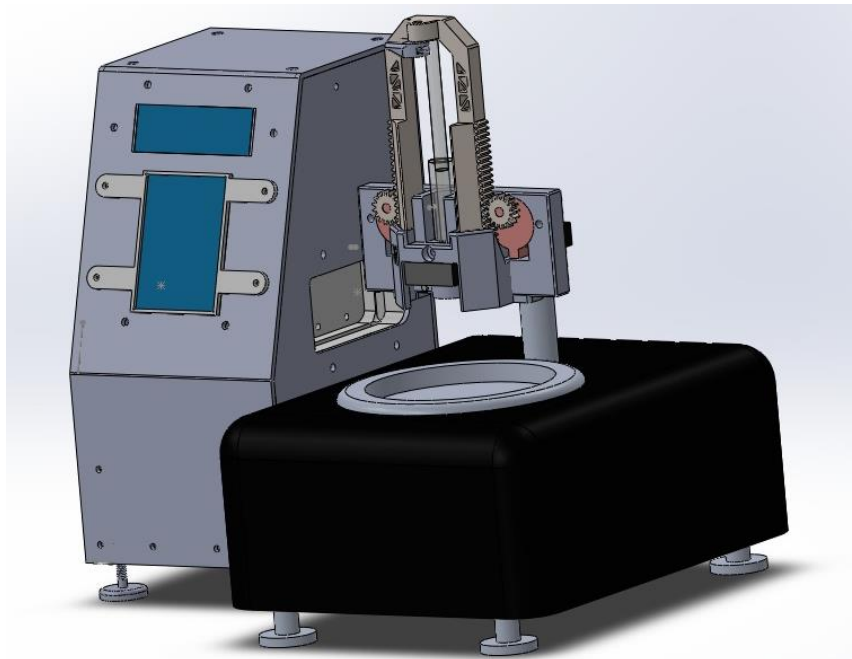


Figura 3.11: Ensamblaje del sistema.

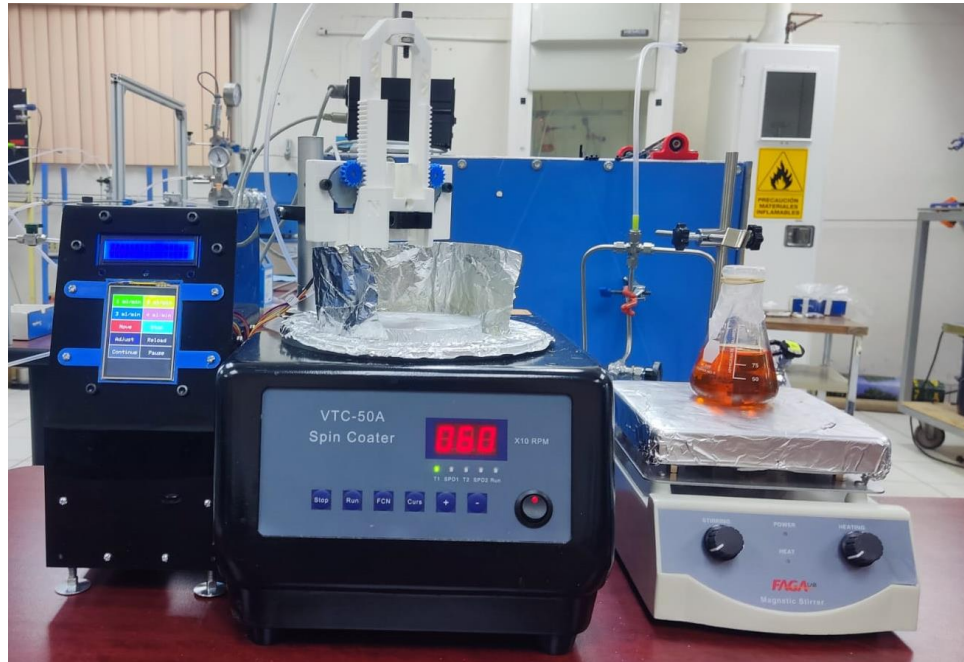


Figura 3.12: Sistema terminado. (De izquierda a derecha) Se muestran el controlador del sistema, el spin coater con el dispensador y el agitador magnético con un matraz de NPsSi.

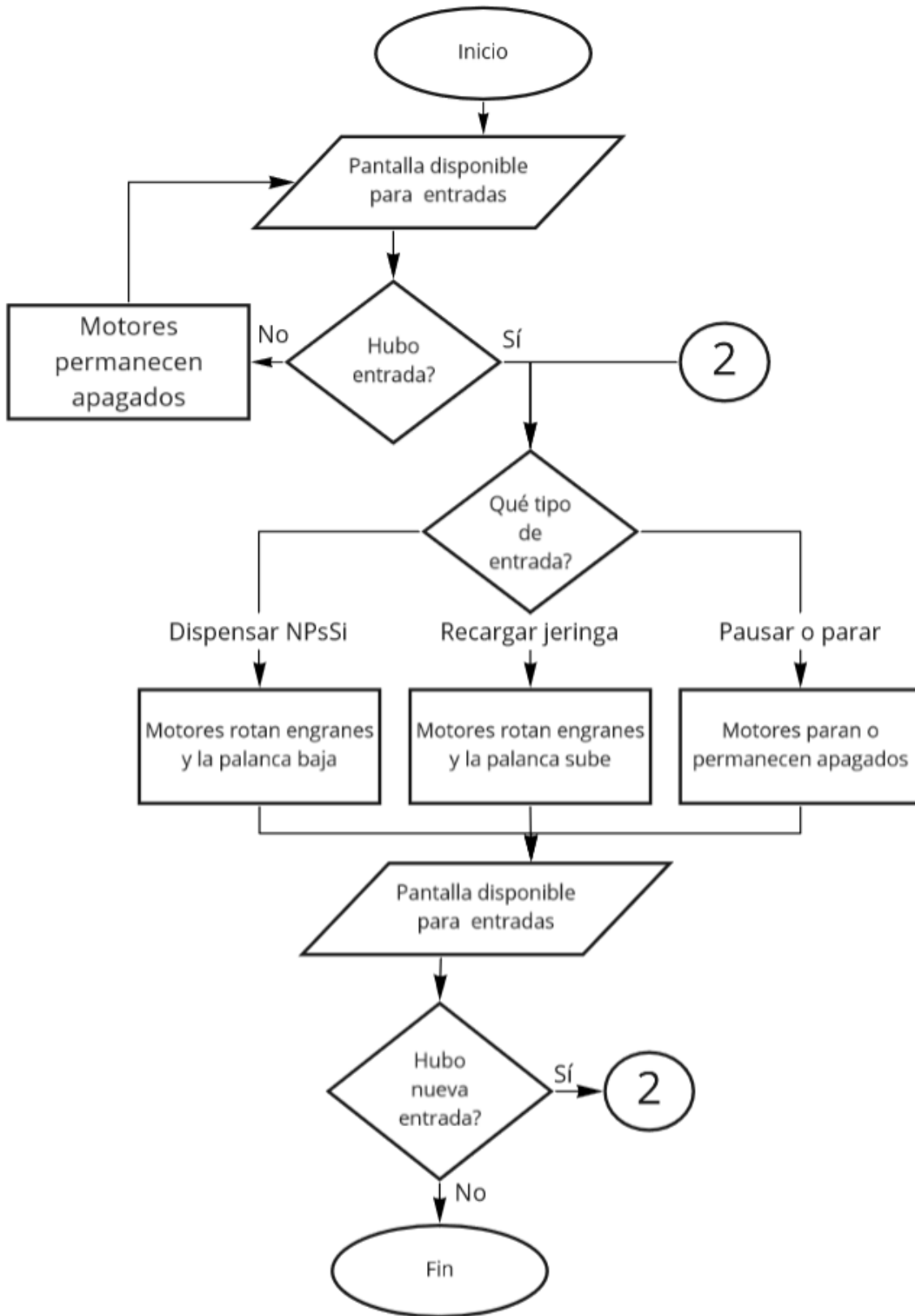


Figura 3.13: Diagrama de flujo del programa del sistema.

Siguiendo con la línea de la mejora del método de incorporación de NPsSi sobre las celdas solares y con el objetivo de determinar cuáles son los parámetros más importantes del método, se realizó un diseño de experimentos de tres factores con dos niveles para los contactos y tratamiento térmico y tres niveles para las capas, éste se muestra en la tabla 3.2.

Muestra	Velocidad y volumen de depósito	Número de capas	Tratamiento térmico	Estado del contacto
J5	1ml/min a 2000 RPM	1	Sí, 100°C por 15 minutos	Descubiertos
		2		
		3		
J6		1	No	
		2		
		3		
J7		1	Sí, 100°C por 15 minutos	Cubiertos
		2		
		3		
J8	1	No		
	2			
	3			

Tabla 3.2: Parámetros de incorporación.

Por último, se analizaron hasta qué punto los efectos de las capas de SiNPs son beneficiosos, para ello se incorporaron hasta 15 capas de NPsSi sobre una CS, que se etiquetó como muestra C4. Los parámetros fueron iguales a los de la muestra J8.

3.4. Caracterización eléctrica de celdas solares.

En esta subsección se describen los métodos empleados para obtener las propiedades de las celdas solares con y sin NPsSi incorporadas. La caracterización eléctrica se realizó por medio de las curvas I-V y P-V así como la obtención de la

eficiencia de las CS como un derivado de la curva I-V. Además de esto, también se estudió la superficie de las CS con la técnica de microscopía electrónica de barrido para conocer la distribución de las NPsSi.

3.4.1. Curvas I-V y P-V

Como ya se explicó en el capítulo anterior, las curvas I-V y P-V son gráficas características de las celdas solares conformadas por el voltaje como eje “x”, cuyo valor máximo es el voltaje de circuito abierto, mientras que el eje “y” es la corriente para la curva I-V, con un valor máximo igual a la corriente de corto circuito; y la potencia para la curva P-V, donde su valor máximo es la potencia máxima. Dentro de la región no lineal de la gráfica I-V se encuentran el valor real de la corriente y el voltaje a máxima potencia. En el caso de la curva P-V estos valores se encuentran en cresta, con el valor máximo.

Para llevar a cabo la caracterización eléctrica y obtener las curvas I-V y P-V, se diseñó un soporte porta celdas para sostenerlas de manera segura y sin ningún riesgo de ruptura, el diseño fue realizado en SolidWorks 2019b y, una vez terminado fue impreso como se muestra en la figura 3.6. Este soporte cuenta con un tornillo que ajusta la presión con la que se sostiene la CS. Para tener un agarre más seguro de la celda solar, se agregaron unos rieles tanto a los lados como junto al área que colinda con el contacto superior. Además de esto, se tiene otro tornillo con el cual se puede ajustar la altura en caso de querer variar la potencia incidente en la muestra.

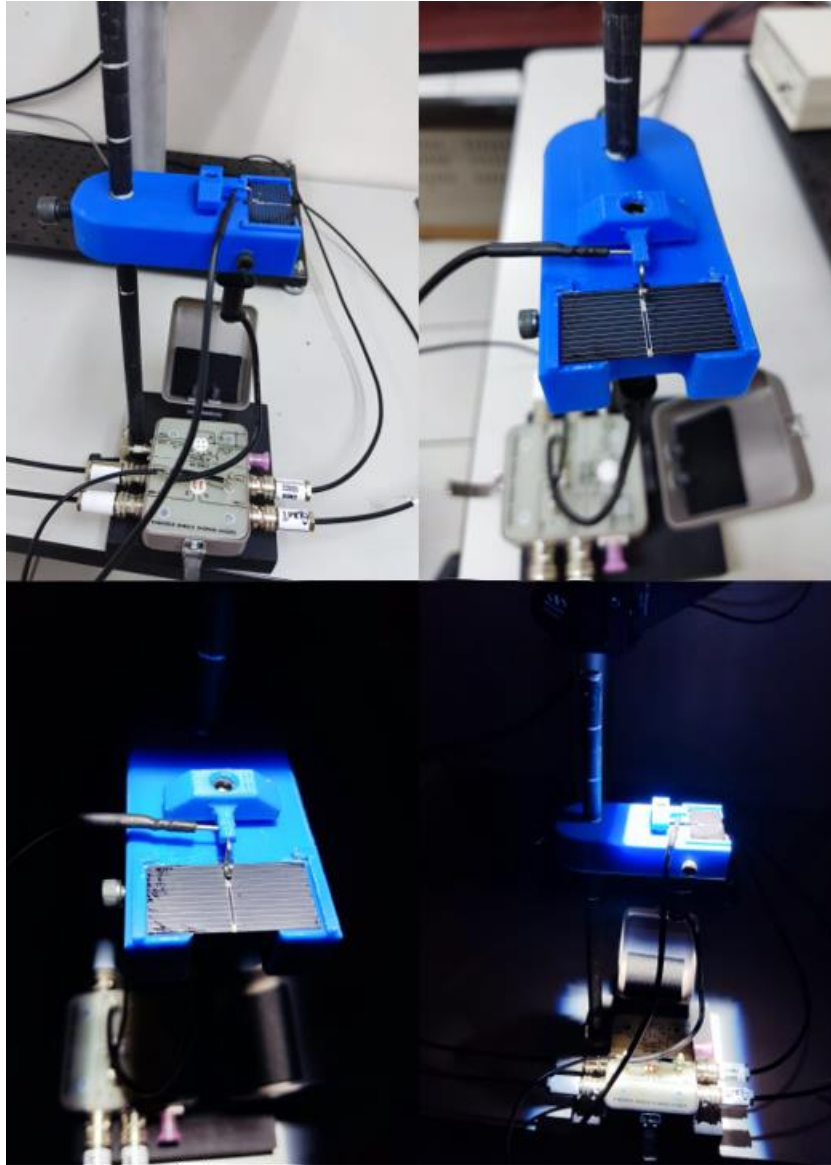


Figura 3.14: Diseño de soporte.

Como fuente de luz solar, se utilizó simulador solar Oriel LCS-100 que, a una distancia de 8 pulgadas, desde el foco a la muestra, brinda una potencia de $100\text{mW}/\text{cm}^2$. Para la medición y recolección de datos se utilizó un analizador de parámetros Keithley 4200A-SCS en combinación con el software Clarius+.



Figura 3.15: Equipo Keithley 4200A-SCS.

Las mediciones se realizaron con un barrido de voltaje desde los -0.5V hasta los 1.5V con pasos de 0.01V sin embargo, para las curvas I-V sólo son relevantes los datos que se encuentran después del cruce en 0V del eje “x” y antes del cruce en 0mA en el eje “y” correspondientes a las coordenadas de la corriente de corto circuito y al voltaje de circuito abierto, respectivamente.

El equipo 4200A brinda los datos de corriente, voltaje y potencia en formato de Excel, para obtener las curvas I-V y P-V sólo se grafican, con la ayuda de Origin 2019b, el voltaje contra la corriente para la primera y el voltaje contra la potencia para la segunda. A partir de estos datos y como ya se mencionó en el capítulo anterior, se pueden obtener los parámetros importantes de las CS y hacer la comparativa de las mejoras que sufrieron al agregarse las NPsSi.

3.4.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM).

Es una técnica que se comporta de manera similar a TEM, pues se incide un haz de electrones sobre la muestra, sin embargo, este en lugar de atravesarla, sólo interactúa con su superficie, esta diferencia hace que los requerimientos de energía

del haz para SEM sean menores que para TEM, contando con valores típicos de 1-30 keV. Al momento de realizarse una medición, la interacción entre la muestra y el haz produce diferentes partículas, entre las principales se encuentran los fotones, electrones secundarios, electrones esparcidos y rayos-X; Cada uno de ellos puede ser captado por detectores especializados que, según el tipo de SEM que se tenga, permiten hacer mapas con los datos proporcionados por cada partícula [81].

SEM es de las típicas caracterizaciones que se utilizan para imagenología de la microestructura y morfología de los materiales, esto porque permite la obtención de parámetros como la composición y la topografía superficial de la muestra que se escanea [82]. El equipo utilizado para llevar a cabo la caracterización de la superficie de las celdas solares con y sin diferentes capas de nanopartículas fue un JEOL JIB-4500 MultiBeam SEM-FIB.

4. Análisis y discusión de resultados

4.1. Tamaño promedio de las NPsSi

El tamaño de las nanopartículas obtenido por medio de dispersión dinámica de luz se encontró entre 1 y 10 nm, con la media en 3 nm. Dado que todas las muestras fueron sintetizadas bajo las mismas condiciones y parámetros, este comportamiento era esperado. Con el objetivo de contar con una imagen de las nanopartículas, también se realizaron mediciones de TEM a las muestras, donde se encontraron tamaños de 40 a 50 nm.

4.1.1. Resultados DLS

Si bien una sola medición de DLS puede proporcionar información acertada de la distribución de sustancias coloidales, el equipo realizó 3 iteraciones para obtener resultados más confiables. Dichos resultados determinaron que las muestras tenían 3 familias de NPsSi, la principal, entre 1 y 10 nm con un máximo en 3 nm; Los histogramas de las mediciones se pueden apreciar en la figura 4.1. Las otras dos familias, que contaban con una contribución de 5% del volumen medido o menor, fueron en los intervalos de 100-1000 nm y cerca por encima de los 2000 nm.

La figura 4.1 a) muestra el histograma de la muestra. Por otra parte, las figuras 4.1 b), 4.1 c) y 4.1 d) contienen la primera, segunda y tercera iteración de la medición realizada a la muestra, respectivamente. Estas sólo muestran la distribución dentro del rango de 1 a 10 nm de diámetro, debido a que es la zona de interés y la que constituye el mayor porcentaje del volumen.

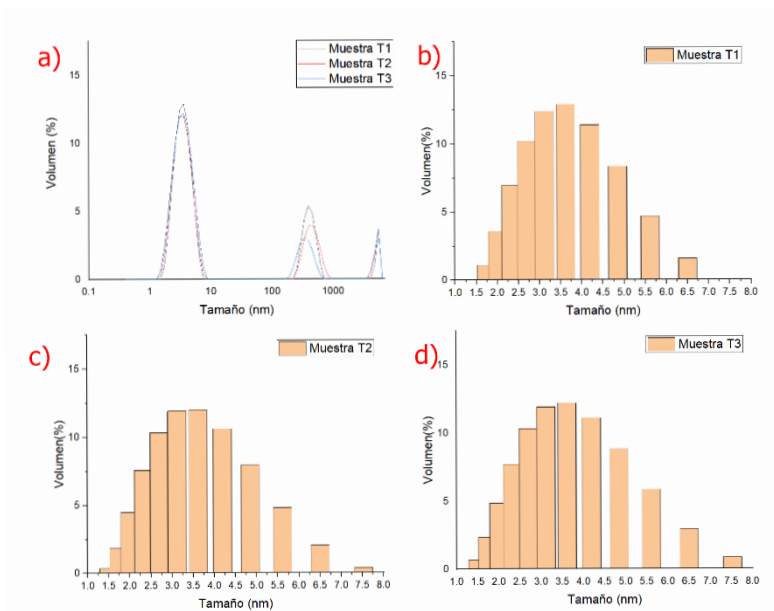


Figura 4.1: Mediciones de DLS de la muestra T de NPsSi.

A pesar de que DLS mide el diámetro dinámico, el cual comprende a una esfera virtual cuyo diámetro es la medida del lado mayor, el tamaño obtenido se encuentra dentro del rango para las nanopartículas sintetizadas por medio del proceso de un sólo paso, tal y como lo reportan López-Delgado et. al. que, variando

ligeramente los parámetros de síntesis, obtuvieron tamaños entre 2 y 3 nm [10], [83].

Otros métodos de síntesis pueden producir nanopartículas de silicio de tamaños similares, como lo reportado por Knipping et. al, quien reportó tamaños promedio de 6 a 11 nm por medio de la descomposición de silano, inducida por microondas en un reactor de flujo de baja presión [84] o lo reportado por Rosso-Vasic et. al. que obtuvieron tamaños de 1.57 ± 0.21 nm a través de una técnica que utiliza moléculas de un surfactante mezclado con una fuente de silicio en una solución acuosa y con sonicación durante todo el proceso [85].

4.1.2. Resultados TEM

Por otra parte, la discrepancia entre las mediciones de DLS y TEM se puede atribuir a que la rejilla utilizada para TEM, a pesar de ser la de mayor resolución disponible, deja pasar a la familia principal de nanopartículas sintetizadas, que es la de diámetro de 3 nm. Por ello sólo se cuentan con imágenes de nanopartículas con diámetros cercanos a los 20 nm o superiores. Sin embargo, las imágenes de TEM ayudaron a determinar otras características, como la separación de los planos cristalográficos, su orientación y morfología.

La figura 4.2 a) contiene una sola nanopartícula con un radio de, aproximadamente, 30 nm. En la parte b) se tienen nanopartículas de diferentes formas con tamaños aproximados de 50 nm; mientras que, 4.2 c) es una ampliación del recuadro rojo de 4.2 b) donde se puede ver parcialmente una nanopartícula de 20 nm. Intrínsecamente, las NPsSi son de forma elípticas con tendencia esférica, sin embargo, pueden adquirir una forma poliédrica dependiendo de las condiciones a las cuales estuvieron sometidas, como la minimización de su tensión superficial al momento de llegar al equilibrio termodinámico [86].

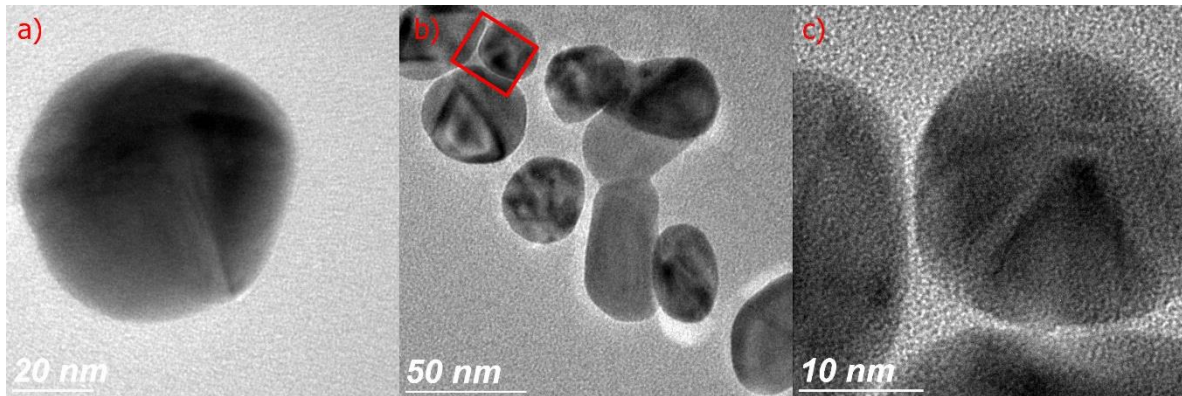


Figura 4.2: Imágenes TEM de la muestra T de NPsSi.

Por medio del software DigitalMicrograph, se procesaron aquellas imágenes de TEM que mostraran los planos cristalográficos de las SiNPs con el objetivo de determinar su separación interplanar. En la figura 4.3 a) Muestra la imagen de TEM, se pueden ver una nanopartícula de 20 nm de radio encerrada en el óvalo negro y un rectángulo rojo representa la primera orientación cristalográfica analizada de esta muestra. La figura 4.3 b) contiene todo el espectro generado del área seleccionada por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT). 4.3 c) es la imagen mostrada en la “imagen 4.3 b)” pero con una máscara para sólo enseñar los componentes principales de frecuencia para después obtener su transformada inversa de fourier (IFFT), que se puede ver en la figura 4.3 e). La figura 4.3 d) es una reconstrucción de la función cosenoidal que dio origen a la FFT de 4.3 c). Con ella se determinó la distancia interplanar de la red cristalina de la nanopartícula, que tuvo como resultado 3.012 Å, valor cercano al del silicio cristalino con estructura diamante y preferencia al plano (1 1 1), por lo que se puede suponer que existe alguna clase de estrés o deformación en la red [87], [88].

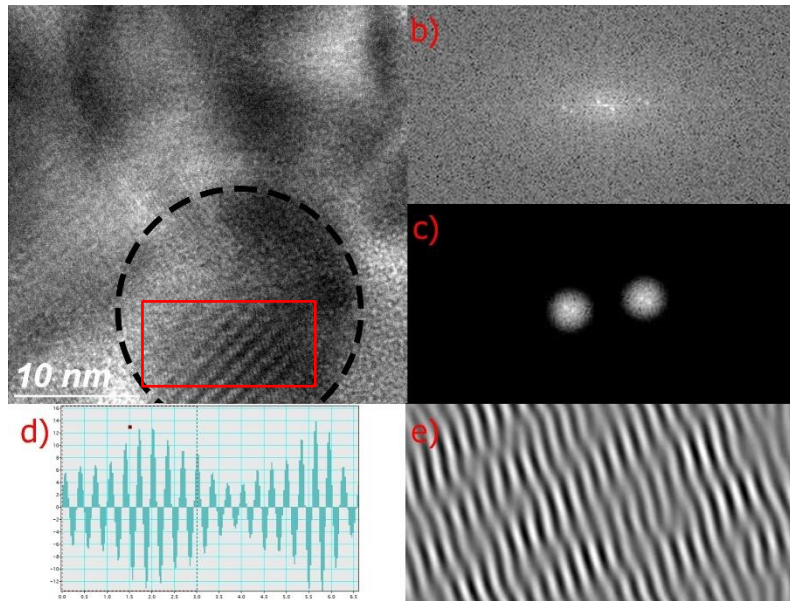


Figura 4.3: Análisis de las imágenes TEM de la muestra T de NPsSi para el primer plano obtenido.

También se analizó otro plano cristalográfico presente en la misma nanopartícula de la figura 4.3 a) pero con una diferente orientación. El recuadro rojo de 4.4 a) es el área del plano seleccionada. 4.4 b) es el espectro obtenido mediante FFT. 4.4 c) es la figura 4.4 b) pero con máscara para poder reconstruir la señal cosenoidal de 4.4 d) que tiene un espectro como el mostrado en 4.4 e). En el caso de este plano, se obtuvo una distancia interplanar de 2.94 \AA , por lo que se puede concluir que se trata también de una estructura en diamante deformada.

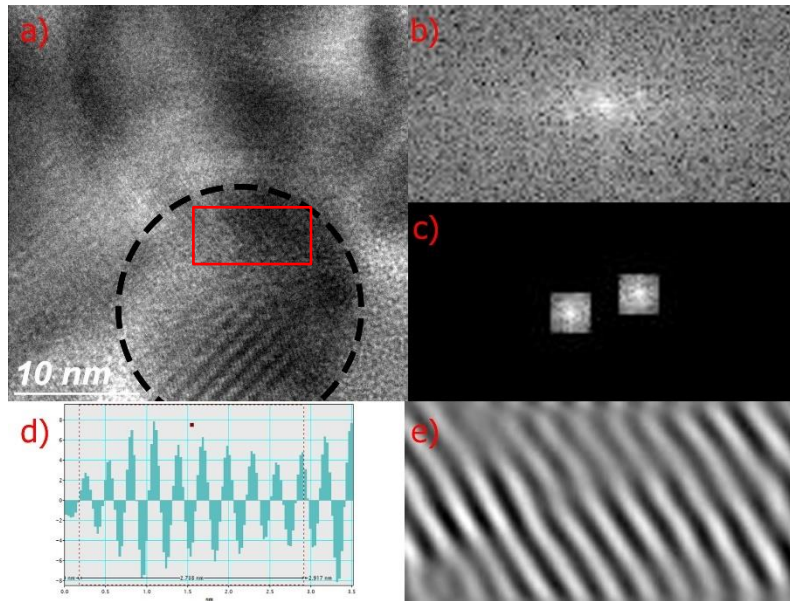


Figura 4.4: Análisis de las imágenes TEM de la muestra T de NPsSi para el segundo plano obtenido.

Por último, se analizó la muestra de otra nanopartícula observada durante la medición de TEM. Similar a los casos anteriores, la figura 4.5 a) muestra la nanopartícula, que tiene un diámetro de 10 nm y forma hexagonal, como ya se comentó antes, esta forma fue adquirida debido a las condiciones bajo las cuáles fue creada. En el trabajo de Mustafa et. al., se menciona que este tipo de estructura es de las más comunes entre nanopartículas con tamaños iguales o mayores a 6 nm. La figura 4.5 b) muestra el espectro de frecuencia de la imagen; la figura 4.5 c) los máximos seleccionados junto con la máscara que, por medio de la IFFT da origen a 4.5 e). La figura 4.5 d) es la función consenoidal obtenida del espectro de 4.5 e).

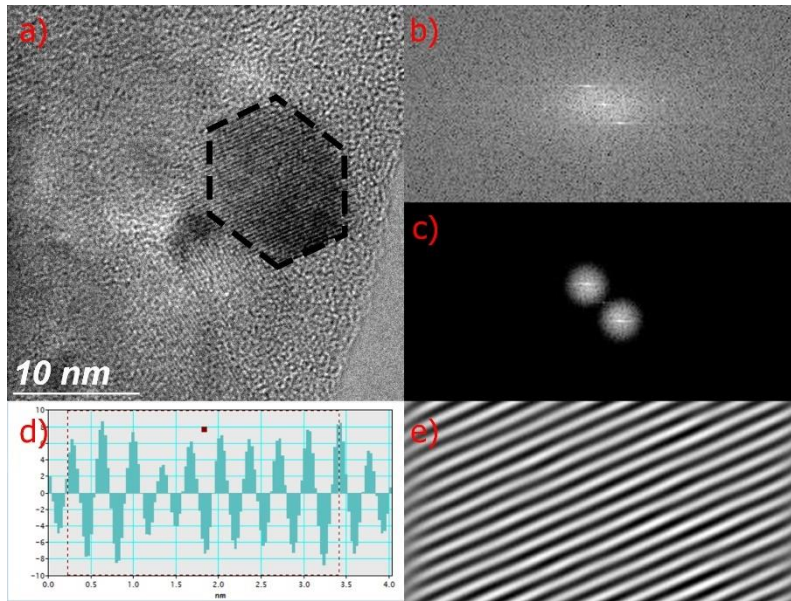


Figura 4.5: Análisis de las imágenes TEM de la muestra T de NPsSi para otra nanopartícula capturada.

En la figura 4.6 se presenta el patrón de difracción de área seleccionada obtenido (SAED, por sus siglas en inglés), que fue analizado para obtener la separación cristalográfica por medio del software ImageJ. Debido al comportamiento circular que tiene el espectro de la figura 4.5 a), se puede concluir que las NPsSi son policristalinas. Los anillos de la imagen se pueden ver en la figura 4.5 b), estos anillos dan como resultado las direcciones hkl de los planos de la muestra analizada.

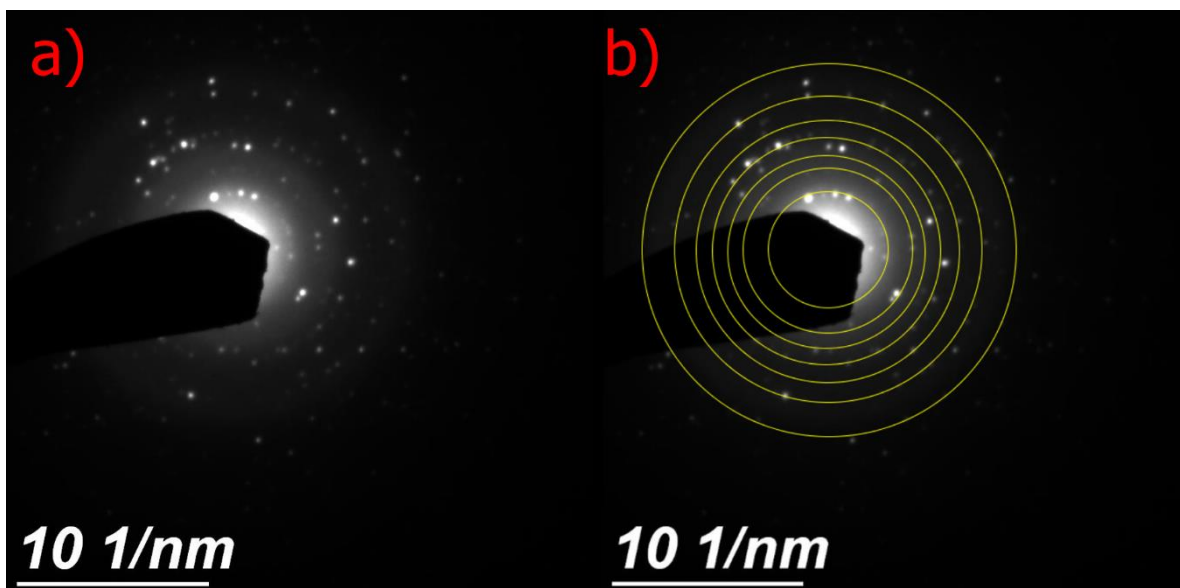


Figura 4.6: Análisis de las imágenes TEM de la muestra T de NPsSi, segundo plano obtenido.

La tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos para el d-spacing de las muestras, comparando con los obtenidos por Mustafa et. al, se puede concluir que se trata de silicio cristalino con estructura de diamante y que posee los planos que se muestran en la columna *hkl*. Las ligeras variaciones que se tienen entre las mediciones de Mustafa et. al. y las obtenidas para la muestra T, se pueden deber a deformación en la estructura cristalina o bien, al error intrínseco que posee el equipo de medición [86].

	Anillo	d_{hkl}	<i>hkl</i>	Grupo
Plano 1	1	3.07	111	Cubic Diamond
Plano 2	2	2.18	111	
Plano 3	3	1.87	220	
Plano 4	4	1.63	311	
Plano 5	5	1.40	400	
Plano 6	6	1.21	331	
Plano 7	7	0.99	511	

Tabla 4.1: Resultados de los anillos de las imágenes SAED.

4.2. Estimación del ancho de banda prohibida y el método de Tauc

El cálculo del ancho de banda prohibida de la muestra requirió que se trabajaran los resultados de absorbancia que se muestran en la figura 4.7, donde se puede apreciar que todas presentaron una alta absorbancia desde los 300 nm hasta los 450 nm.

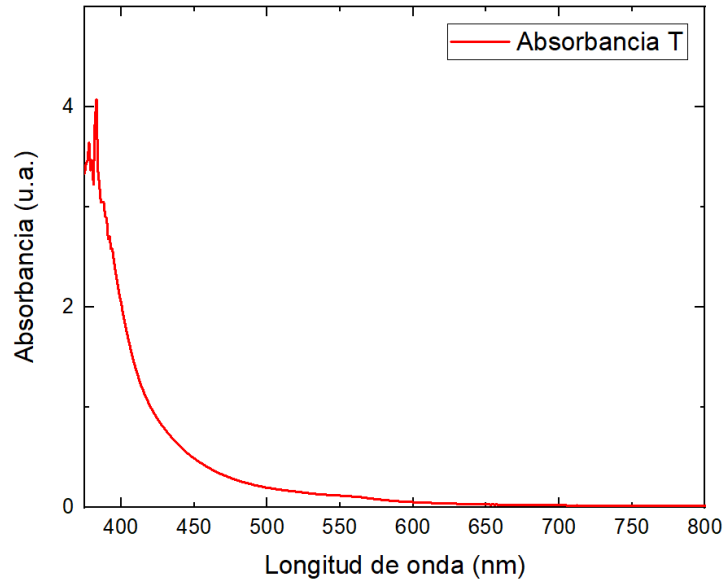


Figura 4.7: Absorbancia para la muestra de NPs T.

Para determinar su ancho de banda prohibida, se procesaron las mediciones de absorbancia obtenidas por medio del método de Tauc y, con la ayuda de un ajuste lineal, se ubicó el ancho de banda prohibida de las muestras. El método de Tauc se lleva a cabo mediante la ecuación que se muestra en la ecuación (E 4.1) [89].

$$(ah\nu)^{1/n} = A(h\nu - E_g) \quad (E\ 4.1)$$

donde:

h = Constante de Planck

a = Absorbancia experimental, proporcional al coeficiente de absorción

ν = Frecuencia de los fotones

E_g = Energía de banda prohibida

A = Constante independiente a la energía

$n = 2$ para el caso de semiconductores con ancho de banda indirecto

Para obtener el ancho de banda según este método, se graficó $(ahv)^{1/2}$ vs. hv y después se realizó un ajuste lineal a la curva resultante para estimar su valor. Como se puede observar en la figura 4.8, los anchos de banda prohibida de todas las muestras fueron extremadamente similares, encontrándose ligeramente debajo de 2.25 eV, que es el valor más común para las NPsSi con características similares a las sintetizadas por los autores Higuera y López-Delgado et. al. [10], [83].

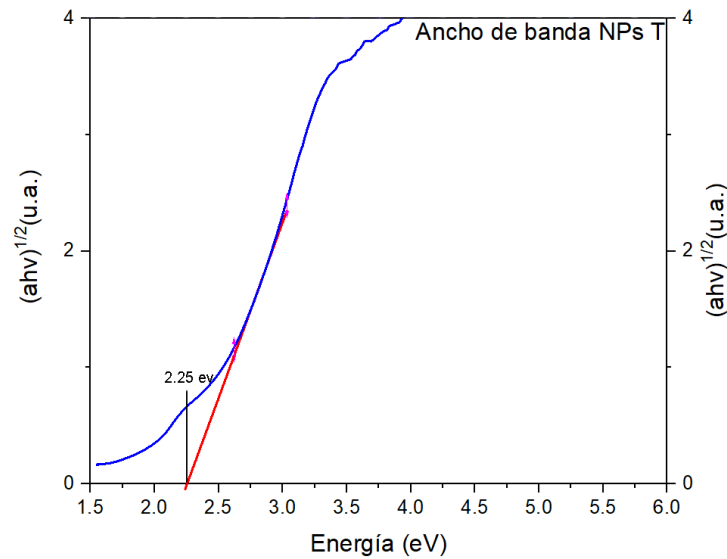


Figura 4.8: Ancho de banda prohibida determinado para la muestra de NPs T.

4.3. Fotoluminiscencia de las NPsSi

Las longitudes de onda de emisión de los NPsSi se obtuvieron mediante espectroscopia de fotoluminiscencia. Los resultados se presentan en la figura 4.9, se puede observar que tienen un máximo de emisión en 499 nm correspondiente a la longitud de onda del color cian con algunas contribuciones de longitudes de onda verde (~585 nm) y azul (~447 nm) mezcladas debido a la presencia de NPsSi de mayor y menor tamaño.

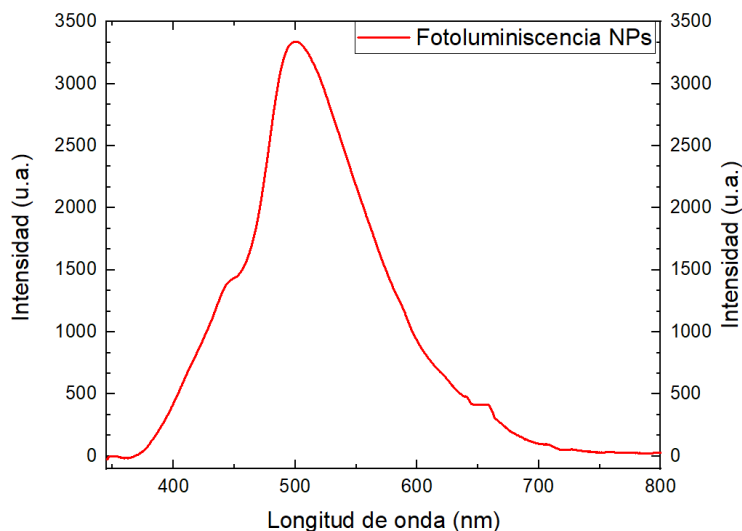


Figura 4.9: Mediciones de fotoluminiscencia de la muestra T de NPsSi.

4.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM) de celdas solares

Para el desarrollo experimental, se utilizaron celdas solares comerciales de silicio policristalino (pc-Si CS) de 1,9 cm de largo y 3,9 cm de ancho. Fueron analizadas mediante SEM con el objetivo de confirmar la presencia y distribución de NPsSi. Además de las celdas recubiertas, también se midió una celda solar de referencia para comparar los resultados con y sin el recubrimiento de NPsSi, sus imágenes se pueden observar en la figura 4.10.

Es importante notar que las celdas solares, al estar fabricadas con un material policristalino, poseen una superficie rugosa, con un tamaño de grano de, aproximadamente, 1 a 8 μm ; Además, se puede afirmar que tienen una forma piramidal, debido a que cuenta con unos bordes en forma de cruz muy marcados. La línea plateada y gruesa que se puede observar en las imágenes con menor zoom es el conducto que dirige a los electrones hacia el bus del contacto principal de la CS.

En la figura 4.10 a) se tiene una CS sin recubrimiento. En la figura 4.10 b) se presenta una ampliación donde se ven los granos de silicio sin presencia de NPs. Por otra parte, en la figura 4.10 d) se puede observar la superficie de otra celda solar

de muestra que ha sido recubierta con NPsSi. Dicha CS también tiene una ampliación en 4.10 e), donde muestra menos contraste entre las puntas y las bases de los granos, lo que se puede atribuir a la emisión de electrones de toda la superficie que, a su vez, confirmaría la existencia de un recubrimiento uniforme. La figura 4.10 c) contiene la superficie de la celda solar con NPsSi apenas visibles, que son los puntos blancos, mientras que en la figura 4.10 f) se pueden visualizar a la perfección NPsSi. Cabe señalar que las NPsSi incorporadas a las celdas solares se distribuyen a lo largo de los bordes de los granos en forma de pirámide, esto es perceptible en la figura 4.10 c) y, en mayor medida, en la figura 4.10 f).

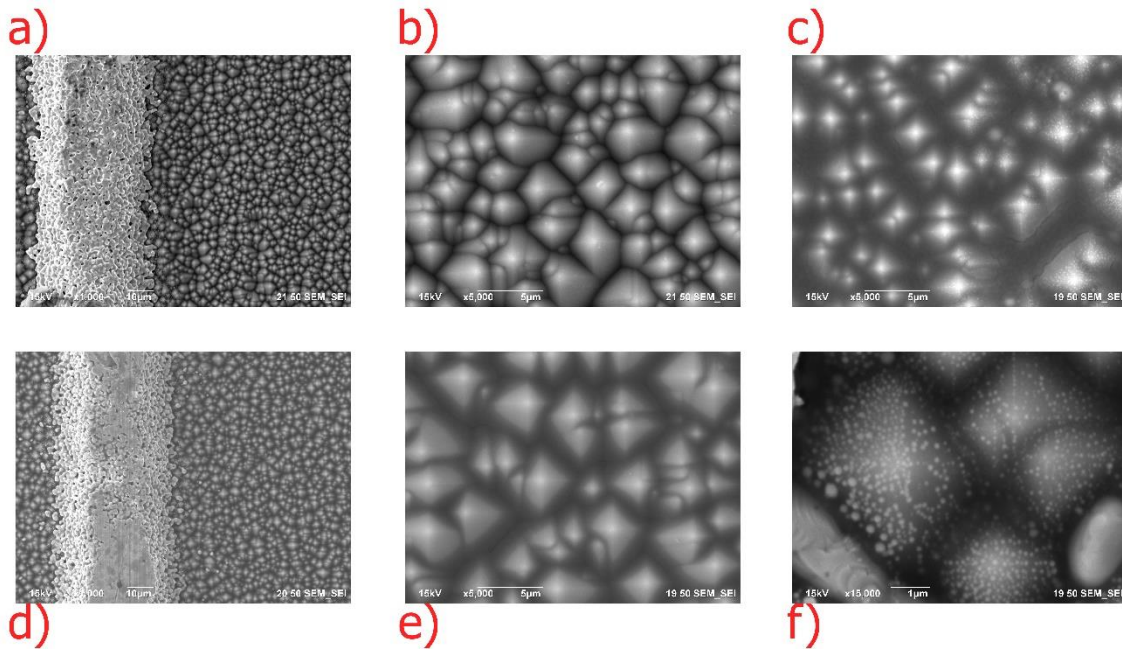


Figura 4.10: Mediciones de SEM; a) y b) Son una CS sin recubrimiento; c) es una CS con NPs Si, se pueden ver los puntos que las representan; d) y e) Son una CS con NPsSi depositadas; f) Es una ampliación de la CS con el recubrimiento, se pueden observar los puntos blancos que representan las NPsSi.

4.5. Caracterización eléctrica de celdas solares

La caracterización eléctrica de las CS consistió en medir sus curvas I-V y P-V antes y después de cada capa de recubrimiento para determinar el cambio en tanto sus eficiencias como sus demás parámetros. Si bien las curvas I-V y P-V se pueden obtener la mayoría de los parámetros importantes de las celdas solares, algunos, como el factor de llenado (FF) y la eficiencia (η) fueron calculados. A modo de demostración, en la tabla 4.2 se brindan los datos obtenidos de la muestra J7 antes del depósito de NPsSi.

Muestra	Parámetros							
	I _{SC} (mA)	V _{OC} (mV)	P _{MAX} (mW)	I _{MAX} (mA)	V _{MAX} (mV)	FF	J _{SC} (mA/cm ²)	η (%)
J7	141.5	540	52.5	128.2	410	0.62	17.3	7.0%

Tabla 4.2: Medición de curva I-V de la muestra J7 sin NPsSi.

En la figura anterior se puede observar que la potencia máxima, el factor de llenado y la eficiencia ya están calculados, esto se puede hacer mediante la interpretación de los datos provistos por el equipo de medición Keithley 4200A-SCS, como se puede ver en las ecuaciones (E3.2), (E3.3) y (E3.4) que muestran el método para obtener la potencia máxima, el factor de llenado y la eficiencia, respectivamente.

La potencia máxima se calcula con la multiplicación de la corriente máxima (I_{MAX}) y el voltaje máximo (V_{MAX}), estos se pueden obtener de la curva I-V. Como ya se ha mencionado anteriormente, otra forma de determinar de forma directa la potencia máxima es ver el valor de la cresta de la curva P-V.

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} = 128.2 \text{ mA} * 410 \text{ mV} = 52.5 \text{ mW} \quad (E3.2)$$

Como la corriente de corto circuito (I_{sc}) y el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) representan los cruces en cero de la curva I-V, si se revisa esta gráfica, se pueden conocer los valores I_{sc} y V_{oc} , que son 141.5 mA y 540 mV respectivamente. Mediante la ecuación (E3.3) y los parámetros mencionados, se puede calcular el factor de llenado.

$$FF = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{sc} * V_{oc}} = \frac{128.2 \text{ mA} * 410 \text{ mV}}{141.5 \text{ mA} * 540 \text{ mV}} = 0.6879 \quad (E3.3)$$

Antes de poder calcular la eficiencia de la celda (η), se tiene que conocer la potencia incidente, esto se obtiene con la ecuación (E3.4).

$$P_{in2} = A * P_{in1} = (3.9 \text{ cm} * 1.9 \text{ cm}) * 100 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2} = 741 \text{ mW} \quad (E3.4)$$

donde:

p_{in2} = Potencia incidente en la CS

P_{in1} = Potencia total del simulador

A = Área de la celda solar

Después, se divide la potencia máxima de la CS sobre la potencia incidente, y da como resultado la razón de conversión de energía de la celda, también conocida como eficiencia:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in2}} * 100\% = \frac{52.5 \text{ mW}}{741 \text{ mW}} * 100\% = 7.08\% \quad (E3.5)$$

Una vez tomadas todas las referencias de las muestras, se procedieron a recubrir con la cantidad de capas de NPsSi definidas en el capítulo 3. Es importante mencionar que, el comportamiento general de las muestras con los contactos descubiertos se caracterizó por una disminución de la corriente de corto circuito, atribuida al hecho de que, entre el contacto del equipo de medición y el contacto de la celda solar ahora hay capas de NPsSi. A pesar de ello, el comportamiento de las gráficas denota un aumento en casi todos los parámetros importantes de las muestras, como el voltaje máximo, corriente máxima, la densidad de corriente y, sobre todo, en la potencia máxima, eficiencia y factor de llenado. Cabe notar que las muestras con tratamiento térmico tienen un rendimiento considerablemente menor que las que no lo tuvieron.

El tratamiento térmico no pareció beneficiar las muestras, pues, aunque tuvieron un buen rendimiento, fue menor al de las muestras que no recibieron tratamiento térmico. A pesar de esto, se tienen aumentos cercanos al 25% en la potencia máxima, voltaje máximo, eficiencia porcentual y factor de llenado de todas las muestras. Mientras que la corriente máxima, la densidad de corriente y la eficiencia absoluta tuvieron crecimientos de, aproximadamente, $2 \pm 1\%$. Si bien las capas tienen comportamientos similares, se puede ver que hay ligeros incrementos en la eficiencia que las separan unas de otras, siendo la CS con 3 capas la que produce la conversión de energía más alta.

Los resultados gráficos para las celdas con los contactos descubiertos y con tratamiento térmico se pueden ver en las figuras 4.11 y 4.12. En las figuras 4.13 y 4.14 se tienen las celdas con contactos descubiertos y sin tratamiento térmico. En la tabla 4.3 se encuentran los valores de todas las muestras de manera detallada.

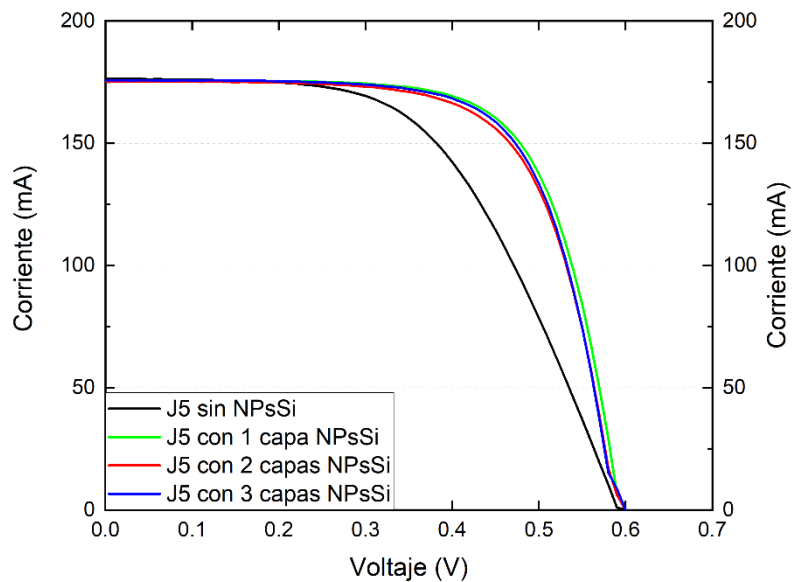


Figura 4.11: Medición de la curva I-V de la muestra J5 con y sin NPsSi, con tratamiento térmico.

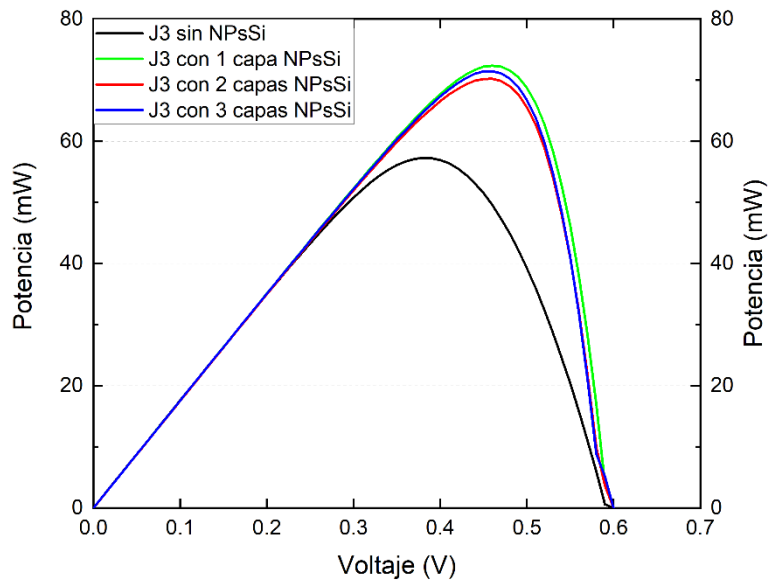


Figura 4.12: Medición de la curva P-V de la muestra J5 con y sin NPsSi, con tratamiento térmico.

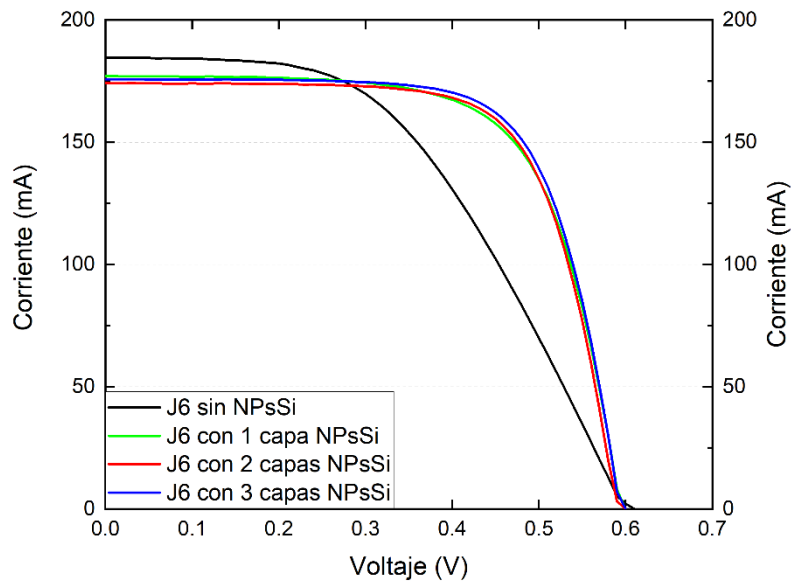


Figura 4.13: Medición de la curva I-V de la muestra J6 con y sin NPsSi, sin tratamiento térmico.

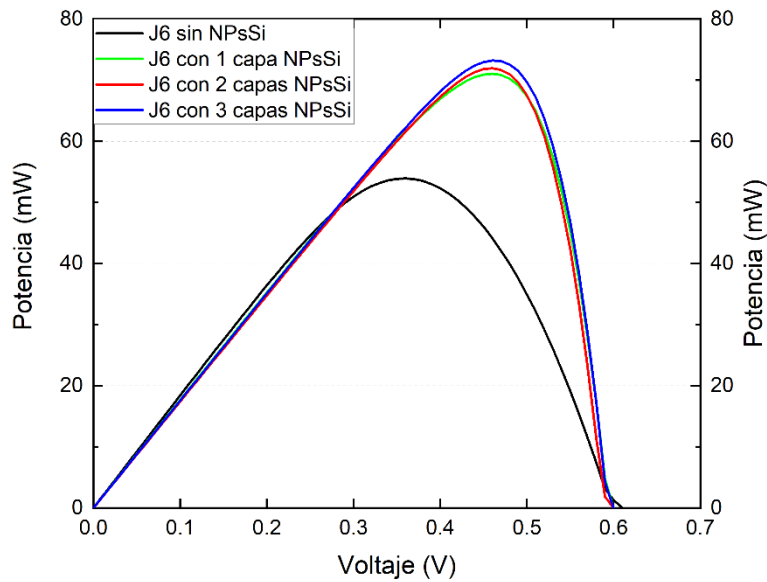


Figura 4.14: Medición de la curva P-V de la muestra J6 con y sin NPsSi, sin tratamiento térmico.

Parámetro	J5	J5 + 1 Capa	J5 + 2 Capas	J5 + 3 Capas	J6	J6 + 1 Capa	J6 + 2 Capas	J6 + 3 Capas
I_{SC} (mA)	176.4	175.3	175.8	175.8	184.6	177	174.2	175.9
V_{OC} (mV)	600	600	600	600	610	600	600	600
P_{MAX} (mW)	57.3	70.2	71.5	72.3	53.9	71.1	71.9	73.2
I_{MAX} (mA)	150.8	152.7	155.4	157.3	149.8	154.5	156.4	159.1
V_{MAX} (mV)	380	460	460	460	360	460	460	460
FF	0.54	0.68	0.68	0.69	0.48	0.67	0.688	0.694
J_{SC} (mA/cm²)	20.3	20.6	21	21.2	20.2	20.8	20.9	21.5
η (%)	7.73	9.48	9.65	9.76	7.27	9.59	9.71	9.88
Aumento(%)	---	+22.63	+24.83	+26.26	---	+31.91	+33.56	+35.05

Tabla 4.3: Medición de curva I-V de la muestras J5 y J6 con y sin NPsSi.

Como ya se había mencionado, se puede notar que en todas las muestras hubo una disminución en la corriente de corto circuito, sin embargo, se tienen aumentos considerables en otros parámetros, como es el caso de la potencia

máxima, que aumentó entre un 31% y 36% al agregarse las capas. Además, la eficiencia tuvo incrementos absolutos importante según el número de capas, con valores de 2.32% para 1 capa, 2.49% para 2 y 2.6% para 3. También, se tienen incrementos en el factor de llenado, que con la muestra de 3 capas, la mejor de todas las analizadas, cambió de 0.48 a 0.694, representando un aumento de 44.9%.

Las curvas I-V de las muestras en las que se recubrieron los contactos, se pueden ver en las figuras 4.15 y 4.17; sus curvas P-V se muestran en las figuras 4.16 y 4.18; mientras que sus datos condensados en la tabla 4.4. Al igual que en caso anterior, se tienen considerables mejoras en todos los parámetros importantes, con la diferencia de que la corriente de corto circuito ya no tuvo una disminución, esto, al igual que en el caso anterior, se atribuye a la interfaz equipo de medición-celda solar, con la diferencia de que, para estas muestras ya no hay capa de NPsSi en medio. De nueva cuenta, la muestra con tratamiento térmico tiene un rendimiento menor que la que no lo tuvo.

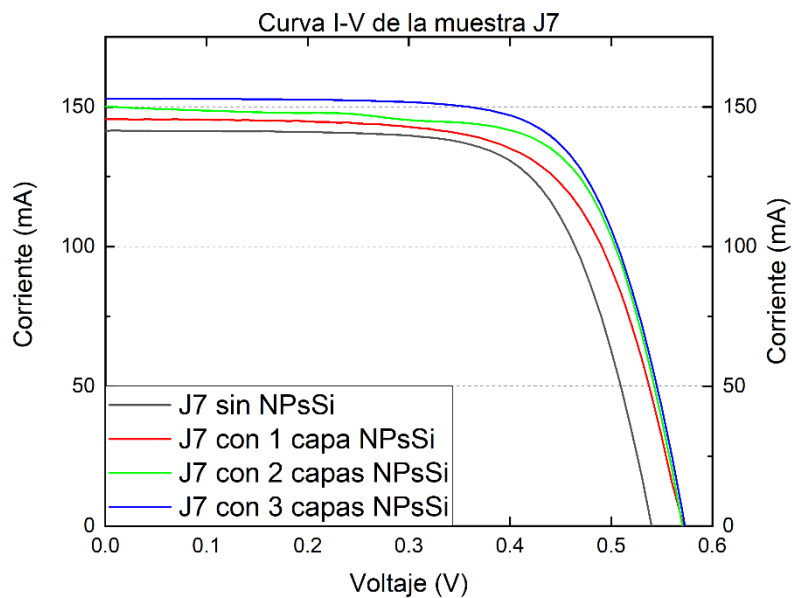


Figura 4.15: Medición de la curva I-V de la muestra J7 con y sin NPsSi, con tratamiento térmico.

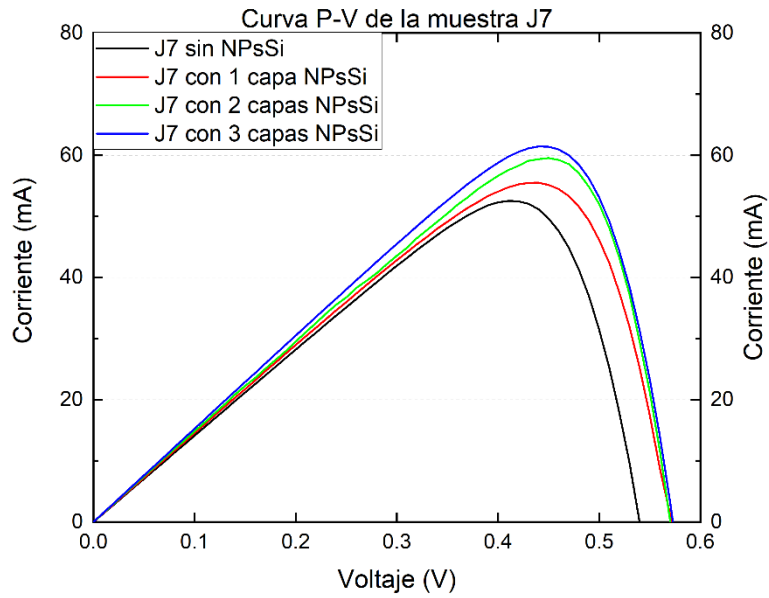


Figura 4.16: Medición de la curva P-V de la muestra J7 con y sin NPsSi, con tratamiento térmico.

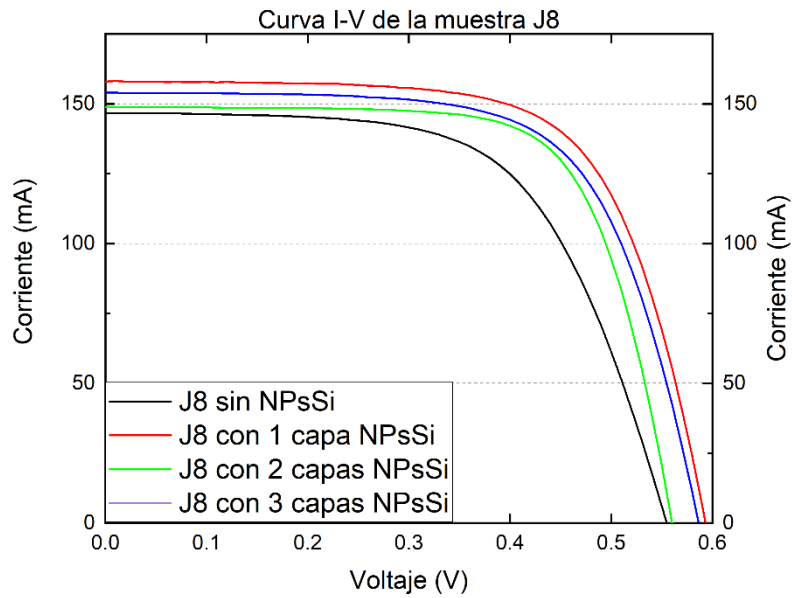


Figura 4.17: Medición de la curva I-V de la muestra J8 con y sin NPsSi, sin tratamiento térmico.

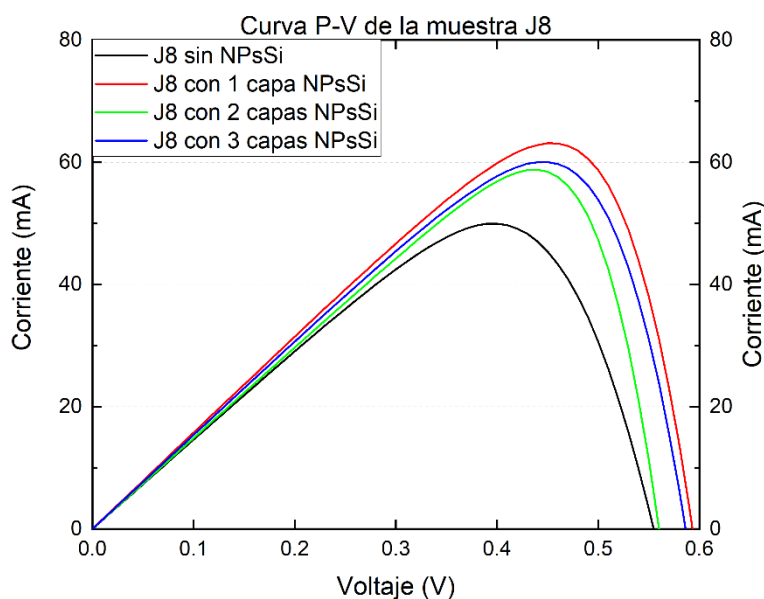


Figura 4.18: Medición de la curva P-V de la muestra J8 con y sin NPsSi, sin tratamiento térmico.

Parámetro	J7	J7 + 1 Capa	J7 + 2 Capas	J7 + 3 Capas	J8	J8 + 1 Capa	J8 + 2 Capas	J8 + 3 Capas
I_{SC} (mA)	141.5	145.6	149.9	152.9	146.7	148.8	154	158
V_{OC} (mV)	540	570	570	570	550	560	580	590
P_{MAX} (mW)	52.5	55.5	59.5	61.4	49.9	58.8	60	63.1
I_{MAX} (mA)	128.2	126.2	132.3	139.6	124.9	133.6	133.4	140.2
V_{MAX} (mV)	410	440	450	440	400	440	450	450
FF	0.62	0.6464	0.6732	0.681	0.572	0.6696	0.6497	0.6769
J_{SC} (mA/cm ²)	17.3	17	17.9	18.8	16.9	18	18	18.9
η (%)	7.0	7.5	8.04	8.3	6.75	7.94	8.11	8.52
Aumento (%)	---	+7.14	+14.9	+18.6	---	+17.62	+20.15	+26.22

Tabla 4.4: Medición de curva I-V de la muestra J7 y J8 con y sin NPsSi.

Las muestras J7 y J8, presentan un comportamiento similar a las muestras anteriores pues hay un mayor aumento en la eficiencia conforme se agregan más capas. Asimismo, de nueva cuenta la muestra sin tratamiento térmico (J8) tuvo

mejor rendimiento que la muestra con tratamiento térmico (J7). A pesar de ello y como era de esperarse, ambas tuvieron un aumento sustancial en sus corrientes de corto circuito, superando las de aquellas muestras que tuvieron los contactos descubiertos. La densidad de corriente también tuvo un aumento considerable en ambas celdas solares, alcanzando mejoras de hasta el 11.84% en la muestra J8 con 3 capas de NPsSi. Cabe mencionar que la tendencia fue el aumento del factor de llenado, la potencia máxima y la eficiencia porcentual entre un 15% y 26%.

La CS J8 con 3 capas tuvo el mayor aumento absoluto de eficiencia con un cambio de 6.75% a un 8.52%, representando un 1.77% de mejora. Sin embargo, los aumentos de eficiencia en ambas CS no fueron tan altos como los de las muestras anteriores, esto se puede atribuir a que el área de la celda que está cubierta por nanopartículas disminuye y si bien no es mucho dentro del panorama general, dada la reducida área que poseen las CS su efecto podría ser mayor al pensado.

Por último, la CS que se recubrió con 15 capas se encuentra en la figura 4.19 y sus datos en la tabla 4.5 que, para una mejor comprensión de los datos, sólo incluye los de las capas más importantes. En ambas gráficas de la figura 4.19 se puede observar este comportamiento, en las líneas superiores se puede ver como si estuvieran repetidas, esas son las capas en las que la eficiencia disminuyó. Para apreciar con más detalle este comportamiento, se presenta una ampliación donde sólo se muestran la CS sin NPsSi y su comportamiento de las capas 12 a la 15, la curva I-V se puede observar en la figura 4.20 y la curva P-V en la figura 4.21. La tabla 4.5 funciona a modo de resumen y contiene los valores de los parámetros pertenecientes a las capas más importantes.

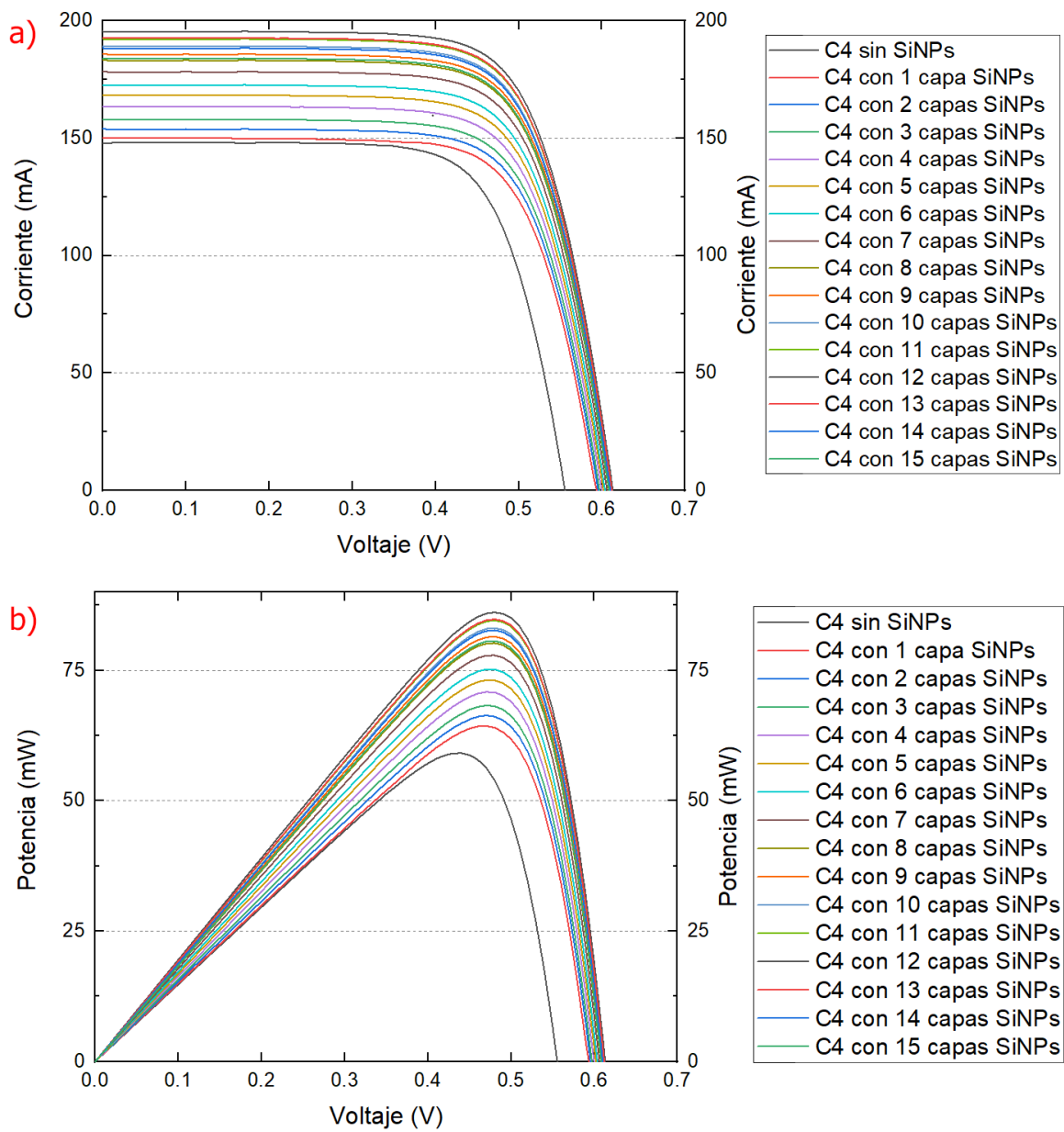


Figura 4.19: a) Medición de las curvas I-V; b) Medición de la curva P-V. Ambas de la muestra C4.

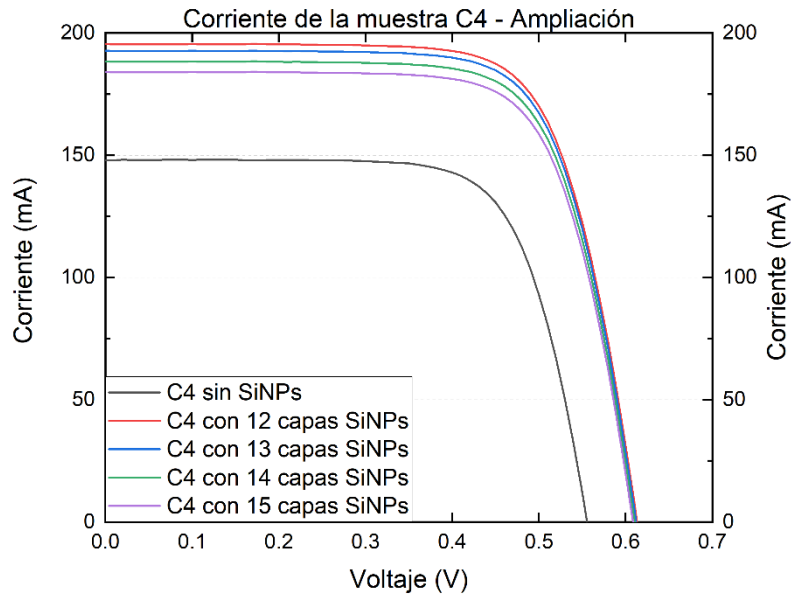


Figura 4.20: Medición de la curva I-V de la muestra C4 con las capas 12 a la 15.

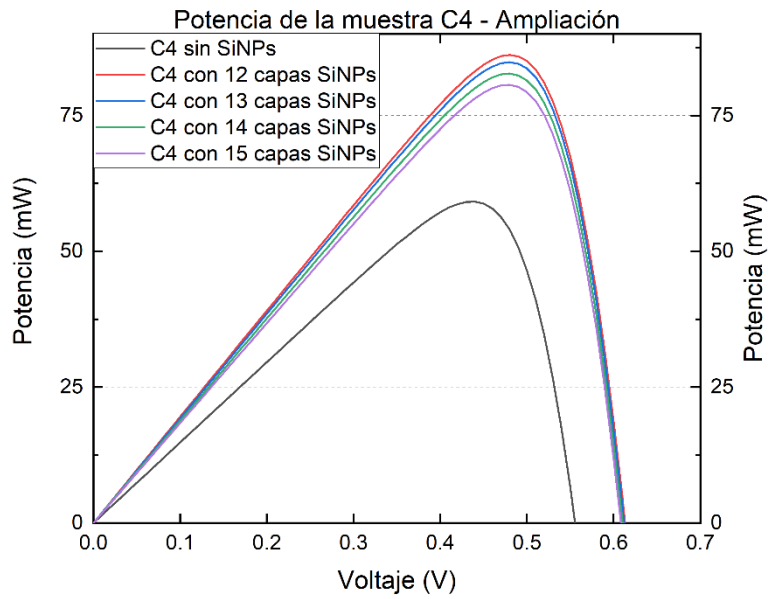


Figura 4.21: Medición de la curva P-V de la muestra C4 con las capas 12 a la 15.

Parámetro	C4	C4 + 3 Capas	C4 + 6 Capas	C4 + 9 Capas	C4 + 12 Capas	C4 + 15 Capas
I _{SC} (mA)	148	158	172.7	185.9	195.6	184.1
V _{OC} (mV)	560	590	600	600	610	600
P _{MAX} (mW)	59.2	68.3	75.2	81.5	86.2	80.7
I _{MAX} (mA)	134.5	145.3	160	169.8	179.5	168.1
V _{MAX} (mV)	440	470	470	480	480	480
FF	0.7141	0.7324	0.7256	0.7308	0.7222	0.7302
J _{SC} (mA/cm ²)	18.1	19.6	21.6	22.9	24.2	22.7
Eficiencia (%)	7.983	9.22%	10.15%	11%	11.63%	10.89%
Aumento (%)	---	+15.45	+27.13	+37.79	+45.64	+36.36

Tabla 4.5: Mediciones de las curvas I-V de la muestra C4 con y sin NPsSi.

La eficiencia de la CS junto con parámetros como la corriente de corto circuito, potencia y densidad de corriente fueron aumentando de manera lineal desde la primera capa hasta llegar a la duodécima capa, a partir de la cual fueron disminuyendo sus parámetros hasta llegar a la decimoquinta capa. En la duodécima capa se tuvo la mayor eficiencia, que alcanzó un valor de 11.63%, un 45.64% mayor que la eficiencia original de la CS. De manera similar, la potencia máxima incrementó desde 59.2 mW hasta 86.2 mW, un cambio de 45.6%. Si bien la tendencia indicó un aumento en los parámetros de la CS con respecto a sus valores originales, el factor de llenado se mantuvo estable en valores cercanos a 0.72, un valor promedio para celdas solares comerciales de silicio policristalino.

El hecho de que la eficiencia comenzara a disminuir se debió a que, cuando se tiene un recubrimiento de NPsSi lo suficientemente grueso, este, en lugar de ser opaco, se vuelve reflejante y el fenómeno downshifting que produce no compensa la gran cantidad de energía incidente que reflejan las capas. Existen algunos métodos para prevenir dicha reflexión, el principal es el uso de películas antirreflejantes como las basadas en ZnO o alúmina.

5. Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló un método preciso y confiable para depositar nanopartículas de silicio y otros líquidos con base en el microcontrolador Arduino y un equipo spin coater. El sistema dispensador diseñado para su uso en la incorporación de NPsSi por medio de la técnica de spin coating prueba ser apto para llevar a cabo el proceso de manera satisfactoria y con poca intervención del usuario, lo que ayudó a llevar a cabo las pruebas y experimentos para concluir esta tesis. El equipo se fabricó de tal forma que si se requiere darle servicio se pueda realizar de forma fácil y segura, además de esto, se tiene un diseño modular, lo que permite que se puedan mejorar componentes o se puedan adaptar para diferentes equipos y procesos, como la mejora y calibración por medio de actualizaciones de software, la sustitución del Arduino mega por un Raspberry Pi para aumentar la capacidad de procesamiento o la adaptación del dosificador para su uso en la técnica de deep coating por medio de una palanca nueva. Por todas estas características que posee y su gran versatilidad, se inició el trámite de una patente para el dispositivo.

El proceso utilizado en la síntesis de las NPsSi es eco-amigable y de bajo costo, porque no requiere reactivos tóxicos ni costosos. De igual manera es un proceso simple porque utiliza de equipos simples para su función que no dependen de presión o temperatura diferentes a la ambiental. Mediante las pruebas que se realizaron a lo largo de la maestría se descubrió que el proceso de un solo paso no está limitado a cantidades pequeñas, pues se logró escalar hasta un volumen 20 veces mayor al original. Con el proceso escalado se tienen resultados extremadamente similares a los del proceso con las cantidades originales.

Los análisis de SEM y TEM realizados sobre las celdas solares y NPsSi demostraron que se tienen distribuciones de NPsSi a lo largo de los ejes de los granos piramidales que conforman las CS, así como que las NPsSi tienen una forma poliédrica y cubren gran cantidad de la superficie de las SC.

Las nanopartículas que se incorporaron sobre la celdas solares probaron mejorar sus eficiencias totales. También se tuvieron incrementos en las corrientes, voltajes y potencias máximas, así como los demás parámetros importantes. Si bien en la mejor muestra, I_{sc} disminuyó en un 4.7%, V_{oc} aumentó en 1.69%. P_{max} pasó de 53.9 mW a 73.2 mW, un incremento del 35.8%; I_{max} y V_{max} aumentaron 6.2% y 27.78%, respectivamente. El factor de llenado se vio ampliamente beneficiado, con un aumento del 44.9%. La eficiencia tuvo un incremento de 7.27% a 9.88%, representando una mejora absoluta del 2.6%, que se traduce a un 35.05% porcentual.

Al realizarse los experimentos con múltiples capas de NPsSi, se descubrió que 12 capas es el límite de capas hasta el cual se tienen mejoras en la eficiencia, pero, debido a su naturaleza policristalina, puede haber variaciones dependiendo de la celda solar que se utilice. Con las capas se consiguieron mejoras de hasta el 45.64% en la eficiencia de una sola CS lo cual es un aumento sustancial para el rendimiento de este dispositivo, incluso bajo la comparación de lo reportado por otros grupos de investigación. De igual manera, se lograron mejoras en todos los parámetros, en particular, la potencia máxima se incrementó de 59.2 mW a 86.2 mW, representando un cambio del 45.6%. Sin embargo, el factor de llenado, que en la capa 12 aumentó con respecto al original en un 1.8%, con respecto al fill factor máximo alcanzado durante el depósito de la capa 9 sí fue menor en un 2.55%.

6. Trabajo a futuro

El estudio de las nanopartículas de silicio como recubrimiento de conversión descendente requiere un amplio estudio e investigación, aun cuando son un material que posee propiedades únicas y de gran interés, exista actualmente gran controversia científica. Es por ello que, como trabajo a futuro se enlistan las siguientes propuestas:

- **Estudio de las nanopartículas de silicio.** Como ya se mencionó, las NPsSi todavía poseen una gran cantidad de efectos y propiedades que se pueden estudiar, de entre ellas, es importante notar las siguientes:
 - El estudio completo de la composición química de la solución sobre la cual están suspendidas.
 - El efecto que tiene el tiempo de maduración de las NPs en su morfología, absorción y emisión. Por medio de UV-Vis se descubrió que desde su momento de síntesis hasta 2 meses después, las NPsSi tienen un corrimiento en su absorción máxima de 50 nm, es decir, si el máximo original estaba en 350 nm, a los 2 meses este se encontraría en 300 nm.
 - Es bien sabido que las nanopartículas tienen la capacidad de sintonizar su emisión de luz por medio del cambio de tamaño, por lo que lograr dicha alteración en el diámetro siempre ha sido un efecto deseado, si bien hasta el momento no se tiene un respuesta en concreto sobre cómo lograr el efecto, se propone que durante la reacción de síntesis del proceso de un solo paso se agregue calor. Esto se debe a que durante los experimentos, se probó realizar la síntesis a 60°C en lugar de los típicos 25°C para ver el efecto que tenía la temperatura sobre el diámetro de las NPsSi, se descubrió que este cambio en la temperatura dio como resultado nanopartículas más pequeñas, con diámetros de 2 nm, es decir una disminución de 1 nm con respecto a las sintetizadas en este estudio, el cambio en tamaño también estuvo unido a un cambio en la emisión, que desde un principio fue en azul.

- **Mejoras en el sistema de incorporación de nanopartículas de silicio.** Se propone realizar una de las siguientes opciones:
 - El diseño y fabricación de un spin coater que se una al sistema para poder tener un control más personalizado de los parámetros de la técnica de spin coating y que este sea conectado al microcontrolador del sistema para que los administre en paralelo con el dispensador
 - La alteración y mejora del spin coater con el que ya se cuenta para que este actúe ante la señal del microcontrolador en lugar de la señal de su botón de inicio. La configuración de los parámetros de depósito se dejaría dentro del mismo spin coater.

Independientemente de la opción que se elija, es recomendable sustituir el microcontrolador de Arduino por un Raspberry Pi, porque el agregar el control de un nuevo sistema (que sería el spin coater) es más fácil en esta plataforma debido a su capacidad de procesamiento en paralelo.

- **Desempeño y estudio del recubrimiento.** Si bien se han estudiado ampliamente las NPsSi en su forma de coloide, poco se ha hecho por caracterizarlas como recubrimiento, por lo que para su caracterización se propone lo siguiente:
 - La obtención del índice de refracción del material.
 - Estudio del efecto del ángulo de incidencia de la luz sobre el recubrimiento. Si bien todas las mediciones de este estudio se realizaron con un ángulo de inclinación de 0°, se piensa que con ángulos de 30° a 45° con respecto a la fuente de luz se tendría un mejor desempeño, esto basado en la forma en que se instalan las celdas solares comerciales.
- Por último, se propone la **prueba de las celdas solares en el campo**, es decir, en lugar de seguir realizando mediciones dentro de un ambiente controlado, que estas se prueben al aire libre para, en un futuro, considerar el uso industrial de las NPsSi.

7. Productos

Se trabaja en la publicación de un artículo, ya está redactado un borrador final que fue enviado a revisión.

Absorbance of silicon nanoparticles used as downshifting coating: Theoretical and experimental approach

J. A. Martínez-Zamora^{1*}; R. J. Borrallés-Linarte²; D. Berman-Mendoza¹; A. Ramos-Carrasco¹; A. Vera-Marquina¹; S. de la Cruz-Arreola²; H. J. Higuera Valenzuela³

¹ *Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Código Postal 83000, Bulevar Luis Encinas Jhonson y Calle Rosales, Colonia Centro, Hermosillo, Sonora, México.*

² *CIDTER, Universidad Politécnica de Chiapas, Código Postal 29150, Carretera Tuxtla Gutiérrez - Portillo Zaragoza km 21 + 500, Colonia Las Brisas, Suchiapa, Chiapas, México.*

³ *Ingeniera Biomédica, Universidad Estatal de Sonora, Código Postal 83100, Avenida Ley Federal del Trabajo, Hermosillo, Sonora, México.*

* *a215210084@unison.mx*

También se comenzó el trámite para el registro de una patente sobre el sistema desarrollado durante la tesis.



UNIVERSIDAD DE SONORA

**Oficina de Transferencia de Tecnología y
Conocimiento**



DECLARACIÓN DE INVENCION

1. Señale un título para su invención.
Sistema dosificador de alto control para soluciones líquidas aplicadas en un spin coater.
2. ¿Es usted el único inventor? Mencione a los demás inventores y su porcentaje de participación en el desarrollo de la invención.

Juan Antonio Martínez Zamora	55%
Antonio Ramos Carrasco	15%
Dainet Berman Mendoza	15%
Alicia Vera Marquina	15%

Y, por último, asistí a la conferencia Optical Interference Coatings Conference 2022 en Whistler, British Columbia, Canadá con el artículo **“Efficiency enhancement of polycrystalline silicon solar cells by a downshifting coating of silicon nanoparticles”** que llegó a los finalistas entre el concurso de investigaciones estudiantiles. En la conferencia impartí una presentación oral de 5 minutos y después una sesión de poster de 1 hora y media para preguntas.

10:10 – 10:15
(UTC - 07:00)

MC.3
Efficiency enhancement of polycrystalline silicon solar cells by a downshifting coating of silicon nanoparticles

Presenter: Juan Martínez Zamora, Universidad de Sonora, Mexico

[PRESENTATION DETAILS](#) [PAPER](#)

Student Paper Finalist



8. Referencias

- [1] S. Fonash, R. Fonash, and S. Ashok, "Solar cell," *Encyclopedia Britannica*, 2020. <https://www.britannica.com/technology/solar-cell/Solar-panel-design#ref289546> (accessed Jul. 24, 2021).
- [2] M. A. Green, "The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 17, no. 3, pp. 183–189, May 2009, doi: 10.1002/PIP.892.
- [3] M. A. Green *et al.*, "Solar cell efficiency tables (version 50)," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 25, no. 7, pp. 668–676, 2017, doi: 10.1002/pip.2909.
- [4] D. N. Wright, E. S. Marstein, and A. Holt, "Double layer anti-reflective coatings for silicon solar cells," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, no. 2027, pp. 1237–1240, 2005, doi: 10.1109/pvsc.2005.1488363.
- [5] H. Hoppe and N. S. Sariciftci, "Organic solar cells: An overview," *J. Mater. Res.*, vol. 19, no. 7, pp. 1924–1945, 2004, doi: 10.1557/JMR.2004.0252.
- [6] D. J. Friedman, J. F. Geisz, and M. A. Steiner, "Analysis of multijunction solar cell current-voltage characteristics in the presence of luminescent coupling," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 3, no. 4, pp. 1429–1436, 2013, doi: 10.1109/JPHOTOV.2013.2275189.
- [7] X. Pi, Q. Li, D. Li, and D. Yang, "Solar Energy Materials & Solar Cells Spin-coating silicon-quantum-dot ink to improve solar cell efficiency," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 10, pp. 2941–2945, 2011, doi: 10.1016/j.solmat.2011.06.010.
- [8] A. Tumay and N. Tore, "Solar Energy Materials & Solar Cells Efficiency improvement of PCDTBT solar cells with silver nanoparticles," vol. 110, pp. 58–62, 2013, doi: 10.1016/j.solmat.2012.12.002.
- [9] R. Moore and N. Drakos, "Quantum Confinement," 2006. <http://phycomp.technion.ac.il/~anastasy/thesis/node10.html>.
- [10] H. Higuera, "Síntesis De Nanopartículas de Silicio Para La Fabricación De

Recubrimientos En Celdas Solares,” 2019.

- [11] E. Klampaftis, D. Ross, K. R. McIntosh, and B. S. Richards, “Enhancing the performance of solar cells via luminescent down-shifting of the incident spectrum: A review,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, no. 8, pp. 1182–1194, 2009, doi: 10.1016/j.solmat.2009.02.020.
- [12] Z. Luo, R. Y. Hong, H. D. Xie, and W. G. Feng, “One-step synthesis of functional silica nanoparticles for reinforcement of polyurethane coatings,” *Powder Technol.*, vol. 218, pp. 23–30, 2012, doi: 10.1016/j.powtec.2011.11.023.
- [13] X. Sun, X. Jiang, S. Dong, and E. Wang, “One-Step Synthesis and Size Control of Dendrimer-Protected Gold Nanoparticles: A Heat-Treatment-Based Strategy,” *Macromol. Rapid Commun.*, vol. 24, no. 17, pp. 1024–1028, 2003, doi: 10.1002/marc.200300093.
- [14] L. T. Canham, “Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, no. 10, pp. 1046–1048, 1990, doi: 10.1063/1.103561.
- [15] I. Umezu, H. Minami, H. Senoo, and A. Sugimura, “Synthesis of photoluminescent colloidal silicon nanoparticles by pulsed laser ablation in liquids,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 59, no. 1, pp. 392–395, 2007, doi: 10.1088/1742-6596/59/1/083.
- [16] Y. Zhong *et al.*, “Large-scale aqueous synthesis of fluorescent and biocompatible silicon nanoparticles and their use as highly photostable biological probes,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 135, no. 22, pp. 8350–8356, 2013, doi: 10.1021/ja4026227.
- [17] A. Khaligh and O. C. Onar, “Energy Sources,” *Power Electron. Handb. 4th Ed.*, pp. 725–765, 2017, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811407-0.00025-8>.
- [18] I. Dincer and Y. Bicer, “3.17 Photonic Energy Production,” *Compr. Energy Syst.*, vol. 3–5, pp. 707–754, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00336-9.

- [19] M. T. Boyd, S. A. Klein, D. T. Reindl, and B. P. Dougherty, "Evaluation and validation of equivalent circuit photovoltaic solar cell performance models," *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 133, no. 2, 2011, doi: 10.1115/1.4003584.
- [20] R. Alam, S. Held, S. Janke, S. Pingel, and B. Litzemberger, "Low Light Performance of Solar Cells and Modules," *Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib.*, no. January, pp. 3231–3236, 2014, doi: 10.4229/EUPVSEC20142014-5CV.2.6.
- [21] M. Rosa-Clot and G. M. Tina, *Introduction to PV Plants*. 2018.
- [22] ISO, "ICS 27.160 Solar energy engineering," p. 14, 1992, [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/17723.html>.
- [23] M. Y. Levy and C. Honsberg, "Rapid and precise calculations of energy and particle flux for detailed-balance photovoltaic applications," *Solid. State. Electron.*, vol. 50, no. 7–8, pp. 1400–1405, Jul. 2006, doi: 10.1016/J.SSE.2006.06.017.
- [24] C. Honsberg and S. Bowden, "Short Circuit Current," 2019. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/short-circuit-current> (accessed Jul. 17, 2021).
- [25] C. Honsberg and S. Bowden, "Open-Circuit Voltage," 2019. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage> (accessed Jul. 17, 2021).
- [26] P. Baruch, A. De Vos, P. T. Landsberg, and J. E. Parrott, "On some thermodynamic aspects of photovoltaic solar energy conversion," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 36, no. 2, pp. 201–222, Feb. 1995, doi: 10.1016/0927-0248(95)80004-2.
- [27] A. H. M. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R. A. van Swaaij, and M. Zeman, "Solar Cell Parameters and Equivalent Circuit," *Sol. energy Phys. Eng. Photovolt. conversion, Technol. Syst.*, pp. 113–121, 2016, [Online]. Available: https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/solar_energy_section_9_1_9_3.pdf.

- [28] M. S. Chowdhury *et al.*, “An overview of solar photovoltaic panels’ end-of-life material recycling,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 27, no. January, p. 100431, 2020, doi: 10.1016/j.esr.2019.100431.
- [29] P. P. Altermatt, “Silicon solar cells,” *Optoelectron. Devices Adv. Simul. Anal.*, vol. 1991, no. May 1998, pp. 313–341, 2005, doi: 10.1007/0-387-27256-9_11.
- [30] K. Yoshikawa *et al.*, “Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%,” *NatEn*, vol. 2, no. 5, p. 17032, Mar. 2017, doi: 10.1038/NENERGY.2017.32.
- [31] J. Reyes, “Paneles solares o módulos fotovoltaicos,” 2020. <https://voltaika.net/panales-solares-o-modulos-fotovoltaicos-2020/>.
- [32] O. Schultz-wittmann and O. Schultz, *High-Efficiency Multicrystalline Silicon Solar Cells Dissertation*, no. January 2005. 2005.
- [33] S. Benagli *et al.*, “High-Efficiency Amorphous Silicon Devices on LPCVD-ZnO TCO Prepared in Industrial KAI TM-M R&D Reactor,” *24th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. 21-25 Sept. 2009, Hamburg, Ger.*, no. 3BO.9.3, pp. 2293–2298, 2009, doi: 10.4229/24thEUPVSEC2009-3BO.9.3.
- [34] D. E. Carlson and C. R. Wronski, “Amorphous silicon solar cell,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 28, no. 11, pp. 671–673, 1976, doi: 10.1063/1.88617.
- [35] M. Nakamura, K. Yamaguchi, Y. Kimoto, Y. Yasaki, T. Kato, and H. Sugimoto, “Cd-Free Cu(In,Ga)(Se,S)₂ thin-film solar cell with record efficiency of 23.35%,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 9, no. 6, pp. 1863–1867, Nov. 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2937218.
- [36] H. W. Schock and R. Noufi, “CIGS-based solar cells for the next millennium,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 8, no. 1, pp. 151–160, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1099-159X(200001/02)8:1<151::AID-PIP302>3.0.CO;2-Q.
- [37] S. (First S. M. Krum, D. (First S. I. Brady, and S. (First S. I. Haymore, “First Solar Builds the Highest Efficiency Thin Film PV Cell on Record,” 2014, 2014. <https://investor.firstsolar.com/news/press-release-details/2014/First-Solar-Builds-the-Highest-Efficiency-Thin-Film-PV-Cell-on->

Record/default.aspx.

- [38] M. Gloeckler, I. Sankin, and Z. Zhao, "CdTe solar cells at the threshold to 20% efficiency," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 3, no. 4, pp. 1389–1393, 2013, doi: 10.1109/JPHOTOV.2013.2278661.
- [39] Solar Energy Technologies Office, "Cadmium Telluride," 2021. <https://www.energy.gov/eere/solar/cadmium-telluride> (accessed Jul. 24, 2021).
- [40] N. A. Khan, K. S. Rahman, F. Haque, and N. Amin, "Design Optimization of CdTe Thin Film Solar Cells from Numerical Analysis," 2014.
- [41] A. Hagfeldt, "Brief overview of dye-sensitized solar cells," *Ambio*, vol. 41, no. SUPPL.2, pp. 151–155, 2012, doi: 10.1007/s13280-012-0272-7.
- [42] R. Komiya, A. Fukui, N. Murofushi, N. Koide, R. Yamanaka, and H. Katayama, "Improvement of the conversion efficiency of a mono-lithic type dye-sensitized solar cell module," 2011.
- [43] M. Kawai, "High-durability dye improves efficiency of dye-sensitized solar cells.," *Nikkei Electronics*, 2013. http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20130131/263532/ (accessed Jul. 24, 2021).
- [44] P. P. Kumavat, P. Sonar, and D. S. Dalal, "An overview on basics of organic and dye sensitized solar cells, their mechanism and recent improvements," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. July 2016, pp. 1262–1287, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.011.
- [45] R. P. Singh and O. S. Kushwaha, "Polymer solar cells: An overview," *Macromol. Symp.*, vol. 327, no. 1, pp. 128–149, 2013, doi: 10.1002/masy.201350516.
- [46] M. Yamaguchi, "High-Efficiency GaAs-Based Solar Cells," *Intech*, vol. 32, no. July, pp. 137–144, 2013, doi: 10.5772/intechopen.94365.
- [47] P. Chiu, S. Wojtczuk, C. Harris, and D. Pulver, "Temperature dependence of InGaP/GaAs/InGaAs concentrators using bifacial epigrowth," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 002523–002526, 2011, doi:

10.1109/PVSC.2011.6186460.

- [48] R. M. France *et al.*, “Design Flexibility of Ultrahigh Efficiency Four-Junction Inverted Metamorphic Solar Cells,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 6, no. 2, pp. 578–583, 2016, doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2505182.
- [49] Y. Jestin, *Down-shifting of the incident light for photovoltaic applications*, vol. 1. Elsevier Ltd., 2012.
- [50] F. C. Chen, *Organic semiconductors*, vol. 1–5, no. October 2017. 2018.
- [51] O. K. Simya, P. Radhakrishnan, A. Ashok, K. Kavitha, and R. Althaf, “Engineered nanomaterials for energy applications,” *Handb. Nanomater. Ind. Appl.*, pp. 751–767, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-813351-4.00043-2.
- [52] N. Shanmugam, R. Pugazhendhi, R. M. Elavarasan, P. Kasiviswanathan, and N. Das, “Anti-reflective coating materials: A holistic review from PV perspective,” *Energies*, vol. 13, no. 10, 2020, doi: 10.3390/en13102631.
- [53] O. V. Semenova, V. A. Yuzova, T. N. Patrusheva, F. F. Merkushev, M. Y. Railko, and S. A. Podorozhnyak, “Antireflection and protective films for silicon solar cells,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 66, no. 1, 2014, doi: 10.1088/1757-899X/66/1/012049.
- [54] K. Ali, S. A. Khan, and M. Z. Mat Jafri, “Effect of double layer (SiO₂/TiO₂) anti-reflective coating on silicon solar cells,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 9, no. 12, pp. 7865–7874, 2014.
- [55] M. Mazur *et al.*, “Functional photocatalytically active and scratch resistant antireflective coating based on TiO₂ and SiO₂,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 380, pp. 165–171, 2016, doi: 10.1016/j.apsusc.2016.01.226.
- [56] S. Rani, P. Suri, P. K. Shishodia, and R. M. Mehra, “Synthesis of nanocrystalline ZnO powder via sol-gel route for dye-sensitized solar cells,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 92, no. 12, pp. 1639–1645, 2008, doi: 10.1016/j.solmat.2008.07.015.
- [57] E. Chanta, D. Wongratanaphisan, A. Gardchareon, S. Phadungdhithidhada, P. Ruankham, and S. Choopun, *Effect of ZnO Double Layer as Anti-Reflection Coating Layer in ZnO Dye-Sensitized Solar Cells*, vol. 79. Elsevier

- B.V., 2015.
- [58] W. H. Weber and J. Lambe, "Luminescent greenhouse collector for solar radiation," *Appl. Opt.*, vol. 15, no. 10, pp. 3–4, 1976.
- [59] A. U. Rehman *et al.*, "Enhancing the Photovoltaic Performance of Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells with Composite Materials and Luminescent Down-Shifting," *J. Electron. Mater.*, vol. 49, no. 11, pp. 6292–6299, 2020, doi: 10.1007/s11664-020-08400-7.
- [60] W. Bin Hung and T. M. Chen, "Efficiency enhancement of silicon solar cells through a downshifting and antireflective oxysulfide phosphor layer," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 133, pp. 39–47, 2015, doi: 10.1016/j.solmat.2014.11.011.
- [61] S. Slavin, K. McEwan, and D. M. Haddleton, "Cobalt-Catalyzed Chain Transfer Polymerization: A Review," in *Polymer Science: A Comprehensive Reference, 10 Volume Set*, vol. 3, Elsevier, 2012, pp. 249–275.
- [62] TechTarget Contributor, "Bohr radius," 2005. <https://whatis.techtarget.com/definition/Bohr-radius> (accessed Jul. 30, 2021).
- [63] S. Chen, L. Shen, P. A. van Aken, J. Maier, and Y. Yu, "Dual-Functionalized Double Carbon Shells Coated Silicon Nanoparticles for High Performance Lithium-Ion Batteries," *Adv. Mater.*, vol. 29, no. 21, 2017, doi: 10.1002/adma.201605650.
- [64] B. V Oliinyk, D. Korytko, V. Lysenko, and S. Alekseev, "Are Fluorescent Silicon Nanoparticles Formed in a One-Pot Aqueous," *Chem. Mater.*, vol. 31, pp. 7167–7172, 2019, doi: 10.1021/acs.chemmater.9b01067.
- [65] F. I. Chowdhury, A. Alnuaimi, N. El-Atab, M. Nayfeh, and A. Nayfeh, "Enhanced performance of thin-film amorphous silicon solar cells with a top film of 2.85nm silicon nanoparticles," *Sol. Energy*, vol. 125, pp. 332–338, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2015.12.030.
- [66] J. Wang, D. X. Ye, G. H. Liang, J. Chang, J. L. Kong, and J. Y. Chen, "One-step synthesis of water-dispersible silicon nanoparticles and their use in fluorescence lifetime imaging of living cells," *J. Mater. Chem. B*, vol. 2, no.

- 27, pp. 4338–4345, 2014, doi: 10.1039/c4tb00366g.
- [67] P. M. Fauchet, “Light emission from Si quantum dots,” *Mater. Today*, vol. 8, no. 1, pp. 26–33, 2005, doi: 10.1016/S1369-7021(04)00676-5.
- [68] National Research Council, “Plasma Processing and Processing Science,” Washington DC: The National Academies Press, 1995, pp. 15–18.
- [69] M. Yedji *et al.*, “Method for fabricating third generation photovoltaic cells based on Si quantum dots using ion implantation into SiO₂,” *J. Appl. Phys.*, vol. 109, no. 8, 2011, doi: 10.1063/1.3575325.
- [70] Plasma-Therm, “PECVD,” 2019. <http://www.plasma-therm.com/pecvd.html> (accessed Aug. 10, 2021).
- [71] E. Mon-Pérez *et al.*, “Experimental and theoretical rationalization of the growth mechanism of silicon quantum dots in non-stoichiometric SiN_x: role of chlorine in plasma enhanced chemical vapour deposition,” *Nanotechnology*, vol. 27, no. 45, pp. 1–12, 2016, doi: 10.1088/0957-4484/27/45/455703.
- [72] J. Wu, J. Dai, Y. Shao, and Y. Sun, “One-step synthesis of fluorescent silicon quantum dots (Si-QDs) and their application for cell imaging,” *RSC Adv.*, vol. 5, no. 102, pp. 83581–83587, 2015, doi: 10.1039/c5ra13119g.
- [73] A. Paar, “The principles of dynamic light scattering,” 2017. .
- [74] M. Aliofkhazraei, *Handbook of nanoparticles*. 2015.
- [75] A. Erbe *et al.*, *How to probe structure, kinetics, and dynamics at complex interfaces in situ and operando by optical spectroscopy*. Elsevier, 2018.
- [76] JoVE Science Education Database, “Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectroscopy,” *Química analítica*, 2021. <https://www.jove.com/es/v/10204/ultraviolet-visible-uv-vis-spectroscopy> (accessed Nov. 28, 2021).
- [77] D. K. SCHRODER, *MATERIAL AND DEVICE SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE Third Edition*, 3 th. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [78] H. Chang and S. Q. Sun, “Silicon nanoparticles: Preparation, properties, and applications,” *Chinese Phys. B*, vol. 23, no. 8, 2014, doi: 10.1088/1674-

1056/23/8/088102.

- [79] D. Leadley, "Transmission Electron Microscopy (TEM)," 2010.
<https://warwick.ac.uk/fac/sci/physics/current/postgraduate/regs/mpagswarwick/ex5/techniques/structural/tem/> (accessed Dec. 05, 2021).
- [80] B. Misof, P. Roschger, and P. Fratzl, *Imaging mineralized tissues in vertebrates*, vol. 3. Elsevier Ltd., 2011.
- [81] Nanoscience Instruments, "Scanning Electron Microscopy," 2021.
<https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy/> (accessed Dec. 07, 2021).
- [82] M. Omid *et al.*, *Characterization of biomaterials*. Elsevier Ltd, 2017.
- [83] R. Lopez-Delgado *et al.*, "Solar cell efficiency improvement employing down-shifting silicon quantum dots," *Microsyst. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 495–502, 2018, doi: 10.1007/s00542-017-3405-x.
- [84] J. Knipping, H. Wiggers, B. Rellinghaus, P. Roth, D. Konjhozic, and C. Meier, "Synthesis of High Purity Silicon Nanoparticles in a Low Pressure Microwave Reactor," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 4, no. 8, pp. 1039–1044, 2004, doi: <https://doi.org/10.1166/jnn.2004.149>.
- [85] R. D. Tilley and K. Yamamoto, "The microemulsion synthesis of hydrophobic and hydrophilic silicon nanocrystals," *Adv. Mater.*, vol. 18, no. 15, pp. 2053–2056, 2006, doi: 10.1002/adma.200600118.
- [86] S. Mustafa, "Chapter 4 Size – dependent structure parameter for silicon nanowires and nanoparticles," no. October 2010, 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.13743.94889.
- [87] W. Han *et al.*, "Structural nature of nanocrystalline silicon," *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 297, pp. 381–388, 1993, doi: 10.1557/proc-297-381.
- [88] G. Viera, M. Mikikian, E. Bertran, P. R. I. Cabarrocas, and L. Boufendi, "Atomic structure of the nanocrystalline Si particles appearing in nanostructured Si thin films produced in low-temperature radiofrequency plasmas," *J. Appl. Phys.*, vol. 92, no. 8, pp. 4684–4694, 2002, doi: 10.1063/1.1506382.

- [89] J Tauc, "Optical properties and electronic structure of amorphous Ge and Si," *Mater. Res. Bull.*, vol. 3, no. 1, pp. 37–46, 1968, doi: 10.1016/0025-5408(68)90023-8.