

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
“Prof. Jorge A. Sabato”

**Elaboración, caracterización y optimización de técnicas de
deposición de contactos metálicos en sensores solares para
aplicaciones espaciales ^(*)**

Por Ing. Rodrigo Alexander Cuzal Toc

Directoras del trabajo
Dra. Mónica G. Martínez Bogado
Dra. Mariana J.L. Tamasi

^(*) Tesis para optar al título de Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales

República Argentina

2022

RESUMEN

Desde la década de los 90, el Departamento Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) investiga y desarrolla sensores de radiación solar, con aplicaciones para usos terrestres y espaciales.

Durante el trabajo de Tesis, se fabricaron un conjunto de sensores de silicio cristalino que presentaron problemas de adherencia en los contactos metálicos. Con el objetivo de resolver el problema presentado se realizaron mejoras en el equipo de electrodeposición de plata, modificando el sistema de sujeción de varillas de acero inoxidable y mecanizando nuevos soportes del sistema de fijación. Además, se realizó un análisis por microscopía electrónica de barrido de los sensores descartados con el objetivo de encontrar impurezas no deseadas en la interfaz metal-semiconductor. Los resultados del análisis de las muestras examinadas no presentaron contaminantes.

Finalmente, con las modificaciones implementadas, se elaboraron y caracterizaron eléctrica y electrónicamente un nuevo conjunto de sensores que no presentaron problemas de adherencia en los contactos metálicos seguidamente del proceso de engrosado y posterior al tratamiento térmico y mostraron parámetros eléctricos acordes a las especificaciones de diseño del sensor.

Palabras clave: Sensores solares, contactos metálicos, aplicaciones espaciales.

ABSTRACT

Since the 1990s, the Solar Energy Department (DES) of the National Atomic Energy Commission (CNEA) has been researching and developing solar radiation sensors, with applications for terrestrial and space uses.

During the thesis work, a set of crystalline silicon sensors were manufactured that presented adhesion problems in the metallic contacts. In order to solve the problem presented, improvements were made to the silver electrodeposition equipment, modifying the stainless-steel rod fastening system and machining new supports for the fastening system. In addition, a scanning electron microscopy analysis of the discarded sensors was performed in order to find unwanted impurities at the metal-semiconductor interface.

Finally, with the implemented modifications, a new set of sensors were developed and electrically and electronically characterized that did not present adhesion problems in the metallic contacts following the thickening process and after the heat treatment and showed electrical parameters in accordance with the design specifications of the sensor.

Keywords: Solar sensors, metal contacts, space applications.

INDICE

Resumen	1
Abstract	2
Índice	3

CAPITULO 1

Introducción	5
Motivaciones	6
1.1 Fundamentos teóricos de la radiación solar	6
1.2. Materiales fotovoltaicos	7
1.3. Funcionamiento del sensor solar	9
Bibliografía	11

CAPÍTULO 2

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SENSORES SOLARES ESPACIALES

2.1. Etapas de elaboración de sensores	13
2.1.1. Limpieza de obleas	13
2.1.2. Evaporación de aluminio	14
2.1.3. Codifusión de dopantes	15
2.1.4. Fotolitografía	18
2.1.5. Depósito de contactos eléctricos	20
2.1.6. Remoción de la fotorresina	22
2.1.7. Engrosado de contactos	23
2.1.8. Tratamiento térmico de los contactos	24
2.1.9. Corte de sensores	24
2.2. Caracterización de los sensores elaborados	24
2.2.1. Medición de la curva corriente-tensión	25
2.2.2. Determinación de la respuesta espectral	29
2.2.3 Caracterización óptica y estructural de sensores	36

Bibliografía	40
CAPÍTULO 3	
OPTIMIZACIÓN DE CONTACTOS METÁLICOS	
3.1. Problemática a resolver	42
3.2. Hipótesis de trabajo	45
3.3. Desarrollo de prototipos	46
3.4. Implementación de modificaciones	53
Bibliografía	54
 CAPÍTULO 4	
RESULTADOS Y CONCLUSIONES	
4.1. Caracterización óptica y estructural	55
4.2. Caracterización eléctrica: curva corriente-tensión	62
4.3. Caracterización electrónica: curva de respuesta espectral	65
4.4. Conclusiones	68
 AGRADECIMIENTOS	70

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Las actividades del Departamento Energía Solar en el tema fotovoltaico se iniciaron a mediados de la década de los años 80. En 1986 se perfeccionó el proceso de crecimiento de cristales de silicio mediante la técnica Czochralski. Posteriormente en 1992, se instaló un horno de difusión y se inició con la elaboración y caracterización de celdas solares. Se desarrollaron modelos teóricos con el fin de optimizar el diseño, la caracterización óptica y eléctrica de los dispositivos fotovoltaicos. Los trabajos que se realizaron fueron la base para diseñar y elaborar, por primera vez en el país, celdas solares de silicio cristalino con eficiencias de conversión del 17%.

A finales del año 1995, el grupo comenzó actividades relacionadas con el desarrollo de celdas y paneles solares para satélites artificiales, en cumplimiento de un acuerdo de cooperación entre la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). En consecuencia, se llevó adelante el primer “Experimento de celdas solares argentinas en el espacio”, que se ejecutó en el satélite argentino SAC-A, puesto en órbita a finales del año 1998.

Posteriormente al exitoso proyecto del SAC-A y con el fin de abastecer los paneles solares para futuras misiones dispuestas en el Plan Nacional, en marzo del año 2001 se firmó el Convenio CONAE-CNEA con el objetivo de desarrollar la tecnología de fabricación y ensayo de los paneles solares y sus componentes. En 2004 se suscribió un nuevo convenio entre estas mismas instituciones con el fin de ejecutar tareas de desarrollo sobre simulación del ambiente espacial, nuevas tecnologías en diseño para integración, ensayo de paneles solares usados en satélites y el estudio de celdas basadas en multijunturas.

En el año 2007, en el transcurso del mes de abril, se suscribió a un nuevo convenio de cooperación entre CONAE y CNEA para la integración y ensayo de los paneles solares para la misión Aquarius/SAC-D, el cual concluyó con el lanzamiento del satélite el 10 de junio de 2011. El objetivo del proyecto fue proporcionar disponibilidad en el país de tecnología calificada y los debidos procedimientos para la integración y los ensayos de calificación de los dispositivos semiconductores como celdas solares, sensores de radiación, diodos, etc.

En ese mismo año, se inició el proyecto “Diseño, elaboración y ensayo de sensores fotovoltaicos para uso aeroespacial y terrestre”, el cual fue financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) en la convocatoria de Proyectos de Investigación Científica y Tecnológica 2006. También el proyecto de Provisión de sensores solares para uso espacial, parte integral del proyecto SNCS *Navigation, Control & Supervision System for Amazonia-1* de INVAP. Para concluir, en marzo del año 2010 se trabajó en el proyecto SAOCOM. Adecuación de la ingeniería de detalle y la integración del modelo de calificación de los paneles solares de las misiones satelitales SAOCOM 1A y 1B [1] [2].

MOTIVACIONES

Poder estudiar, caracterizar y optimizar los contactos metálicos frontales y posteriores de los sensores solares elaborados en el DES desde hace más de dos décadas. El foco principal se realizará en las técnicas de deposición y engrosado electroquímico de los dispositivos fotovoltaicos. Se adaptarán las técnicas para que se obtengan sensores según los requerimientos de las futuras misiones satelitales estimadas por la CONAE entorno al Plan Espacial. Los sensores son utilizados en su gran mayoría para el control grueso de actitud de los satélites, según sea la misión, estos son diseñados y elaborados en base a las características y especificaciones de esta.

La capacidad de producir componentes diseñados y elaborados en el país provoca un gran impacto, pues proporciona la sustitución de componentes comerciales de la industria espacial, que son de muy alto costo, con otros de tecnología nacional como ya fue realizado en la misión VS-30, AQUARIUS/SAC-D, AMAZONIA-1, SAOCOM 1A y 1B.

1.1. Fundamentos teóricos de la radiación solar

El espectro de radiación que emite la capa exterior del Sol y que se recibe en la superficie de la Tierra antes de ingresar a la atmósfera, es similar a la radiación que caracteriza a un cuerpo negro a 6000 K [3], como puede apreciarse en la Figura 1. La intensidad de la radiación o la irradiancia total que se recibe fuera de la atmósfera terrestre es esencialmente constante y recibe el nombre de constante solar G_{sc} o radiación AM0 (por las siglas en inglés de *Air Mass 0*). El valor actualmente aceptado de la constante solar es de 1366,1 W/m² [4]. La distribución espectral

de la radiación AM0 y la de un cuerpo negro ideal (Figura 1) se debe a diferencias en la transmisividad de la atmósfera solar a distintas longitudes de onda.

Al atravesar la atmósfera terrestre, la luz solar resulta atenuada en al menos un 30% debido a la dispersión por moléculas y partículas de polvo y, por absorción de los gases que constituyen la atmósfera. En condiciones atmosféricas de cielo claro, el parámetro más importante para la determinación de la potencia total es la longitud de camino que recorre la luz solar a través de la atmósfera. Cuando el Sol está en dirección vertical, el camino es mínimo y se la conoce como radiación AM1 (*Air Mass* 1). Si el ángulo respecto de la vertical es θ , resulta que la masa de aire AM se define como (ecuación 1) [5]:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1)$$

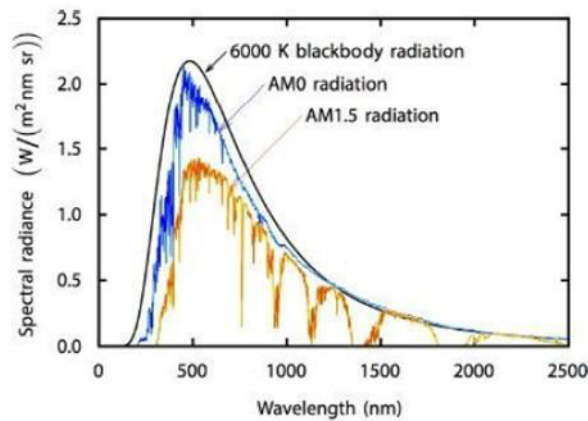


Figura 1. Distribución espectral de la radiación del cuerpo negro a 6000 K. Espectros AM0 y AM 1.5 [7].

Para permitir una comparación consistente entre diferentes dispositivos solares en distintos lugares, se define el espectro AM1.5 (Figura 1) estandarizado a una densidad de potencia global de 1000 W/m^2 .

1.2. Materiales semiconductores

La conversión fotovoltaica de la energía solar se basa en la propiedad que tienen algunos materiales de absorber radiación electromagnética y transformarla en portadores de carga eléctrica libres. Estos materiales, que son la base de las celdas y sensores solares, son los llamados semiconductores.

Existen distintos tipos de elementos semiconductores, los semiconductores covalentes son elementos de la columna IV de la tabla periódica, como el Si y el Ge. A diferencia de otros semiconductores que son los compuestos formados por relaciones estequiométricas de elementos de las columnas III y V (GaAs, InSb, InAs), por elementos de grupos II y VI (ZnSe); así como compuestos ternarios (GaInP₂; GaInAs₂), entre otros [2] [6].

Los semiconductores cuyas propiedades físicas dependen de la presencia de impurezas son llamados extrínsecos. Para obtener semiconductores de este tipo se introducen en el cristal cierto número de impurezas con una concentración mucho menor que la del constituyente básico. Este proceso es denominado proceso de dopaje. Un ejemplo, para obtener Si tipo n, las impurezas provienen de la columna V de la tabla periódica (P, As), las mismas aportan cuatro electrones para satisfacer los enlaces covalentes, dejando un quinto libre.

En el caso de querer obtener silicio tipo p, el dopante introducido debe pertenecer al grupo III (B, Al, etc.) que tienen tres electrones en su último nivel, al no completar los cuatro enlaces con los átomos vecinos del Si, se requiere del atrapamiento de un electrón, dejando un hueco positivo libre en la banda de valencia.

Así como existen varios materiales semiconductores con la capacidad para la fabricación de celdas y sensores solares, el silicio es el material más utilizado. Al tener una abundancia natural, el extenso estudio de sus propiedades físicas y su utilidad en la industria electrónica son factores esenciales para la actualidad, en las formas cristalino, policristalino y amorfo cubran casi en su totalidad el mercado fotovoltaico (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción de la abundancia en la naturaleza de los elementos utilizados en la elaboración de dispositivos fotovoltaicos [2].

Elemento	Abundancia (p.p.m)
Si	2,6X10 ⁵
Ge	7
Ga	15
As	5
Cd	0,15
Te	0,003

El silicio se encuentra en la arena, que es en su forma básica dióxido de silicio. En primer lugar, es pasar de la arena a la forma conocida de silicio grado metalúrgico, para esto se debe reducir el dióxido de silicio con carbono en grandes hornos de arco.

Los sensores fotovoltaicos con alta eficiencia para usos espaciales son fabricados a partir de Si. En este trabajo se utilizaron obleas de silicio cristalino tipo p (dopadas con boro con concentración $1,5 \cdot 10^{16} \text{at/cm}^{-3}$) comerciales de 5 cm por 10 cm de lado obtenidas con el método Czochralski [2].

1.3. Funcionamiento del sensor solar

El principio de funcionamiento del sensor solar es el efecto fotovoltaico. Para aprovechar los portadores fotogenerados en un material semiconductor, es necesario fabricar con él, un dispositivo fotovoltaico, como puede ser una celda o un sensor, que consiste básicamente en una juntura p-n de un material semiconductor.

Una juntura p-n tiene una asimetría electrónica en su estructura. En la región n la concentración de los electrones es mucho mayor que la de los huecos, por lo cual existe gran cantidad de electrones libres pero baja densidad de huecos. El nivel de Fermi se encuentra cerca de la banda de conducción. Por el contrario, en la región tipo p, existe gran cantidad de huecos y pocos electrones.

Al formarse la juntura p-n se produce un reajuste de cargas debido al gradiente de concentraciones presentes para cada tipo de portadores. Huecos de la región p se desplazan a la región n donde se recombinan generando una zona de carga espacial, mientras que los electrones se mueven en sentido contrario. Cuando se tiene el mismo material base para los semiconductores n y p, se dice que es una homojuntura p-n [7].

Para el diseño de un sensor solar se deben cumplir una serie de parámetros que tienen que tomarse en cuenta con el fin de encontrar el valor óptimo de la eficiencia del dispositivo, estos están relacionados con la recombinación, siendo estas superficial y en volumen, de los portadores minoritarios en cada región y con pérdidas de potencia por disipación óhmica. Algunos de estos parámetros interaccionan entre sí de forma que establezca una relación de compromiso entre ellos. Así pues, la concentración de dopante en la superficie frontal resultante en la elaboración de la juntura debe ser grande para asegurar un adecuado contacto óhmico con la grilla frontal (contactos metálicos).

Pero también, al mismo tiempo, la presencia de impurezas no deseadas en la red cristalina provoca el deterioro de la vida media de los portadores en la región, de la misma manera se deterioran las propiedades del dispositivo.

El dispositivo puede considerarse dividido en tres regiones: una región frontal (emisor), una región de transición, más conocida como juntura (que es una región de vaciamiento de carga volumétrica espacial, es decir una barrera o región de campo eléctrico grande); y una región posterior (base) (ver Figura 2) [7]. Tanto la primera como la última región son zonas neutrales.

Los sensores solares de Si, elaborados en el presente trabajo presentan una estructura del tipo $n^+ - p - p^+$ [5] [6]. El signo “+” manifiesta al hecho de que el emisor frontal (n^+) y posterior (p^+) están fuertemente dopados.

Los espesores típicos de los sensores elaborados se pueden observar en la Figura 2. El espesor de la capa n^+ es del orden del μm . Por otra parte, el espesor de la base p es mayor (entre 300 y 350 μm) y depende del compromiso entre la necesidad de minimizar las recombinaciones electrón-hueco y permitir la mayor captación de fotones posible, para la que se requiere cierto espesor [6]. Además, el espesor del emisor posterior p^+ ronda los 3 μm .

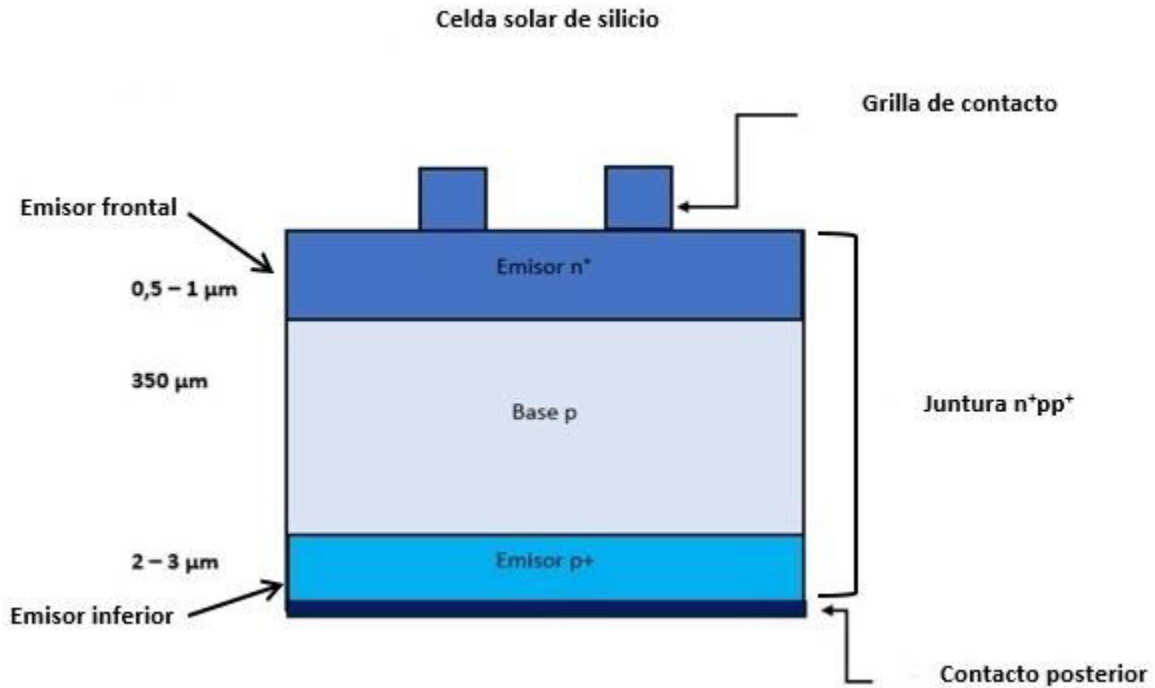


Figura 2. Esquema de sensor solar con estructura $n^+ - p - p^+$.

Durante el trabajo de Tesis, se elaboró un conjunto de sensores solares con la estructura antes mencionada, haciendo hincapié en la formación de los contactos eléctricos metálicos frontal y posterior.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. J. L. Tamasi, M. G. Martínez Bogado, S. E. Rodríguez, I. Prario, H. P. Socolovsky, J. C. Plá, M. A. Alurralde, C. Nigri, A. Filevich. Diseño, fabricación, caracterización y ensayos de sensores fotovoltaicos para la misión satelital Aquarius-SAC-D, 1-8 (2007).
- [2] Martínez Bogado, M. G. (2004). Diseño, elaboración, caracterización y ensayos de dispositivos fotovoltaicos para usos espaciales [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de General San Martín]. 5-9, 19, 21, 113.
- [3] Duffie, J. Beckman, W. (2013) Solar Engineering of Thermal Processes. Pp. 140-141.

- [4] ASTM No E 490-00, Standard extraterrestrial spectrum reference, <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am0/ASTM2000.html>, 2000.
- [5] M.A. Green, Solar cells: Operating Principles, Technology and System Applications, University of New South Wales, Australia, 1986. Páginas 4-6, 62-65.
- [6] Kondratiuk, N. (2016). Diseño, desarrollo, elaboración y caracterización de sensores fotovoltaicos de radiación UV. [Tesis de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires]. Páginas 5, 6, 8-10, 12, 13.
- [7] Isabella, O. Smets. A. Jager, K. Van Swaaij, R. Zeman, M (2016). Solar Energy. The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. Página 71.

CAPÍTULO 2

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SENSORES SOLARES

2.1. Etapas de elaboración de sensores

Inicialmente se describirá el proceso para la fabricación de los dispositivos solares basados en homojunturas de silicio cristalino, denominados como sensores solares gruesos de posición para usos espaciales. Estos se producen completamente en el Departamento Energía Solar de la CNEA.

En la elaboración se contempla: la limpieza de obleas, la evaporación de aluminio para la formación de la junta posterior, la difusión del dopante (en este caso fósforo) con el uso de un horno térmico y además incluye los procesos de fotolitografía, evaporación y plateado electrolítico de los contactos metálicos frontal y posterior [1] [2].

2.1.1. Limpieza de obleas

En las superficies de las obleas de silicio se deben tener condiciones libres de contaminantes en la mayor medida que sea posible. Los contaminantes pueden ser moleculares, iónicos o atómicos o de alguna otra naturaleza. Los residuos de algunos de los procesos, entre ellos pulido y fotorresistencia, tienen una naturaleza molecular. Las impurezas por iones en general ocurren por absorción de la solución de fotolitografía; en contraparte la contaminación de los metales pesados como la plata tiene un carácter atómico [3].

- **Pulido químico:** se compone de una solución de ácidos, siendo estos, HF (ácido fluorhídrico), HNO_3 (ácido nítrico), CH_3COOH (ácido acético) con una relación de (6:30:15 en volumen) respectivamente, es usado para que se remuevan residuos derivados del proceso de corte acumulados en la superficie y también algunos daños en la estructura cristalina que puedan ser superficiales (ver Figuras 1-2).
- **Limpieza orgánica:** su provecho se basa en compuestos alcalinos con alto PH que remueven sustancias orgánicas (ver Figura 3).
- **Limpieza inorgánica:** su beneficio se basa en compuestos ácidos de bajo PH que descartan iones alcalinos y metales contaminantes no removidos en limpiezas anteriores.

En las figuras 1 a 3 se observa el proceso realizado para eliminar daños producidos en el proceso de elaboración, residuos de solventes y suciedad provocada en el proceso de corte con las dimensiones requeridas.

		
Figura 1. Preparación para el proceso de pulido químico.	Figura 2. Pulido químico isotrópico de obleas.	Figura 3. Limpieza orgánica RCA- 1 (Solución de agua deionizada, agua oxigenada e hidróxido de amonio).

2.1.2. Evaporación de aluminio

Las obleas de silicio usadas en el trabajo son tipo p y se encuentran dopadas con impurezas de boro. Se requiere realizar una difusión de una impureza del tipo n, de esta forma se obtiene la juntura n-p. Adicionalmente se pretende que los sensores tengan un emisor posterior fuertemente dopado: p+, en otras palabras, una región que sea más dopada que la misma oblea para crear un emisor posterior. Se realiza una evaporación, por efecto Joule, de una capa de aluminio (dopante tipo p) que tenga un valor de pureza muy alto, antes del proceso de difusión.

Luego de la limpieza orgánica, se debe realizar una limpieza de las obleas con HF (ácido fluorhídrico) diluido previo a la evaporación de Al, luego se enjuagan las obleas con agua deionizada y se las seca con N₂ (pureza 99,98). Posteriormente, se realiza la quema de las naves de evaporación; cuyo proceso tiene por objetivo, eliminar las impurezas presentes, ya que es el lugar donde se coloca el aluminio y consiste en el calentamiento de los filamentos fabricados con alambre trifilar de tungsteno en la cámara de alto vacío ($\approx 1 \cdot 10^{-6}$ Torr). Una vez realizado el citado paso, se procede a la evaporación de 2 gramos de Al en las superficies de las caras de las obleas, 4 muestras se realizan simultáneamente en este paso [1][4].

En las figuras 4 a 7, pueden observarse algunas de las etapas del proceso de evaporación.



Figura 4. Cámara de alto vacío.



Figura 5. Dispositivo de sujeción de obleas de Si.



Figura 6. Unidad de control del equipo de evaporación en alto vacío.



Figura 7. Evaporación por efecto Joule de Al sobre obleas de Si.

2.1.3. Codifusión de dopantes

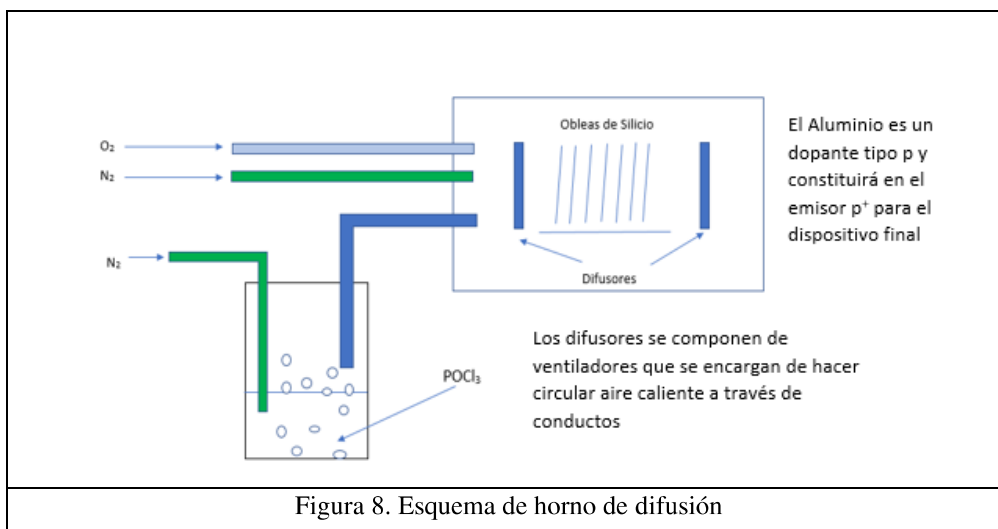
Para procesos sencillos de elaboración de sensores solares es práctico minimizar el número de pasos en horno a una alta temperatura.

La difusión de un paso se aplica en este proceso, se realiza mediante la codifusión de P y Al simultáneamente, provocando la formación de una estructura n⁺-p-p⁺ [4].

En los procesos de difusión y el posterior proceso de oxidación es usual utilizar un horno calentando eléctricamente con un tubo de cuarzo, siendo este tubo la cámara donde se colocan las muestras. El material del que está hecho posee una alta resistencia al calor, siendo la temperatura de fusión del cuarzo es 1730 °C, mucho mayor a la temperatura de trabajo. En la tecnología de fabricación de dispositivos solares, las temperaturas de difusión se encuentran en un intervalo entre 800 °C y 1200 °C. Las obleas de silicio a tratar se sitúan en la zona de temperatura constante del horno en bandejas de cuarzo [1].

El proceso de difusión se efectúa en el horno a alta temperatura (generalmente 900°C), se ejecuta mediante un control automático programado según los requerimientos, la elevación de la temperatura se lleva a cabo por rampas de calentamiento a la temperatura de proceso y de enfriamiento. El dopante tipo n se obtiene de una fuente líquida de oxicloruro de fósforo (POCl₃). Por burbujeo de nitrógeno, el fósforo que contiene el POCl₃ es llevado dentro del horno. En el proceso realizado se crea a la vez la juntura frontal n⁺-p y la juntura posterior p-p⁺ [4].

En la figura 8, se presenta un esquema del horno de difusión y los elementos principales que lo conforman.

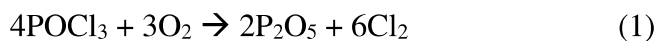


En el proceso de difusión se llevan a cabo dos etapas:

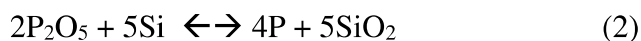
- En la primera se forma un vidrio rico en fósforo por encima de la superficie de silicio, siendo esta denominada predisposición.
- En la segunda, el fósforo se difunde al interior de la oblea, llamada esta etapa redistribución o drive-in.

Ambas etapas se realizan en el proceso de difusión en un único proceso, descartando que se realice para las obleas un ingreso y salida, con ello se reduce al máximo que se lleguen a contaminar [4].

El oxiclорuro de fósforo (POCl_3), se mantiene en un burbujeador a 0-40 ° C. Es utilizada una mezcla de gas oxidante, resultando en la formación de P_2O_5 en algún punto del sistema anterior de la zona de difusión, la reacción preliminar es (ecuación 1):



La reacción superficial de la que procede la difusión viene dada por la ecuación 2 [5]:



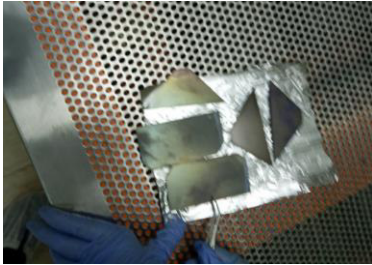
El fósforo proveniente de esta reacción es el dopante tipo n en las obleas tipo p.

El proceso de difusión de un paso con drive- in en N_2 , que se está utilizando actualmente en el Departamento es el que se observa en la Tabla 1:

Tabla 1. Proceso de difusión. Parámetros típicos de difusión en un paso con recocido en N_2 .

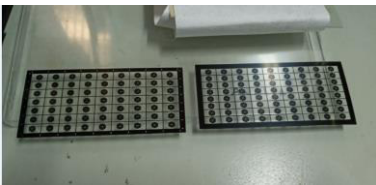
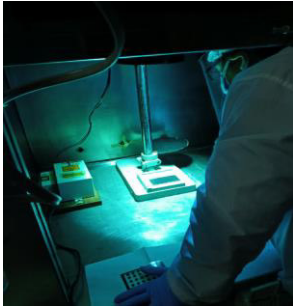
Etapas	N_2 (l/min)	O_2 (l/min)	POCl_3 %	T (min)	T (°C)
Predeposición de P	0,5	0,5	0,4	5	890
Baño en N_2	7	7	-----	5	890
Recocido y Oxidación	0,5	0,5	-----	15	890
<i>Drive in</i>	7	7	-----	90	890

En las figuras 9 a 11, se observa las distintas etapas del proceso de codifusión de fósforo y aluminio.

		
Figura 9. Boca 2 del horno de eléctrico de difusión a alta temperatura.	Figura 10. Ingreso de obleas a la Boca 2 para el proceso de codifusión.	Figura 11. Obleas difundidas.

2.1.4. Fotolitografía

La fotolitografía es el proceso que consiste en transferir el patrón de la máscara de la grilla de contacto a la cara frontal del sensor (ver figuras 12 a 14). En las figuras puede verse parte de las etapas del proceso de fotolitografía, que incluye la creación de una capa de fotorresina, la utilización de máscara patrón y la transferencia del patrón para las grillas de los sensores de resinas sensibles a (UV).

		
Figura 12. Formación de capa de fotorresina realizado en el centrifugador.	Figura 13. Mascaras patrón.	Figura 14. Exposición de oblea difundida a luz ultravioleta.

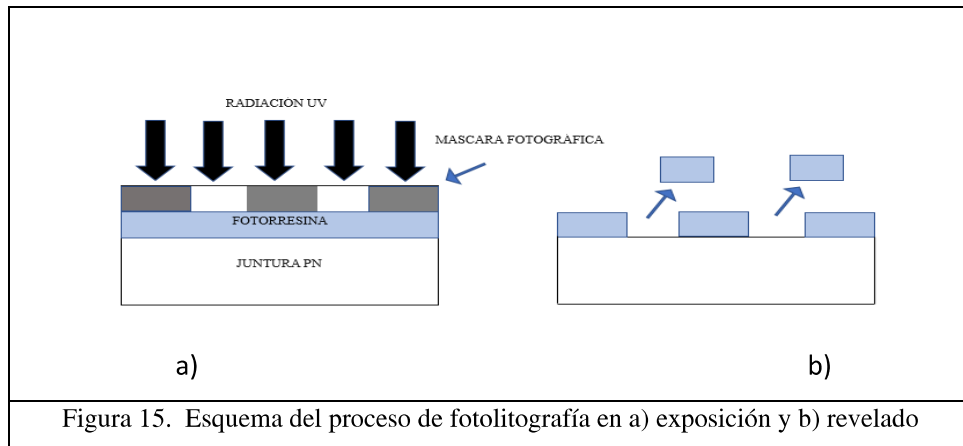
La fotolitografía es una técnica que permite definir la grilla del contacto eléctrico. Así pues, al difundirse P y Al y crear las regiones n^+ y p^+ , se requiere que se fabriquen en el sensor los contactos metálicos precisos para recolectar la corriente que se genera en éste.

Al haberse formado los emisores se debe depositar la grilla metálica como contacto frontal y un contacto completo en la superficie posterior.

Las etapas del proceso son las siguientes [4] [5]:

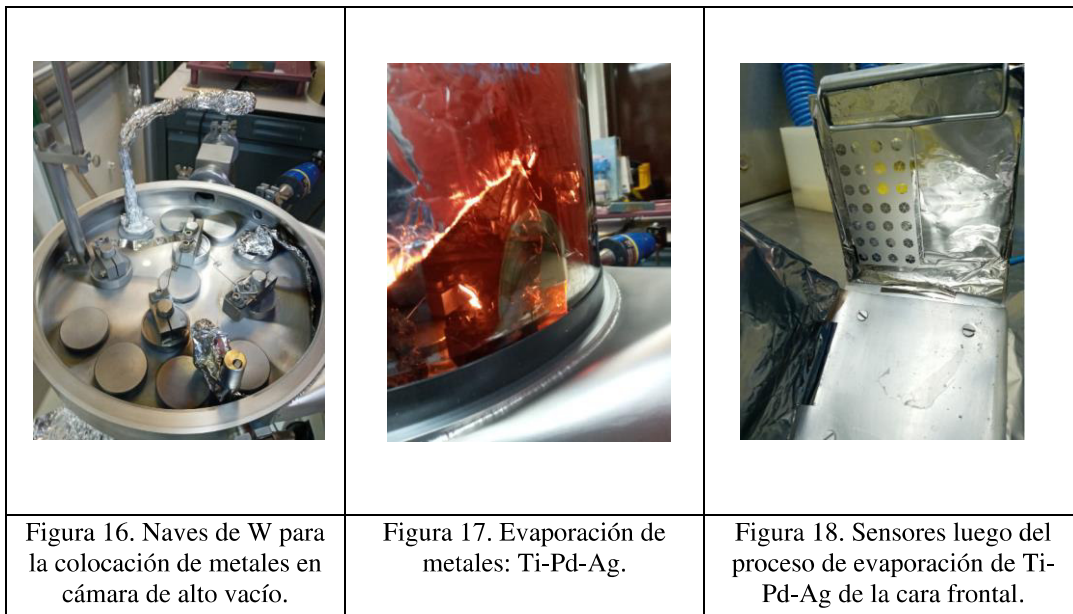
1. Secado de las muestras antes de realizar la exposición a la luz ultravioleta. Se colocan las obleas en un horno a 100°C durante 1 hora. Este proceso es llamado “*soft-baking*”.
2. Depósito de la fotorresina sobre la muestra. La oblea se encuentra sujeta por la cara que se asienta sobre una base horizontal la cual tiene un orificio y es por está donde actúa el vacío que provee un centrifugador desarrollado en el DES.
3. La utilidad del centrifugador permite lograr una capa perfectamente adherida, uniforme y sin partículas y orificios libres de resina. La velocidad de giro de 3000 rpm fue usada para obtener una película de fotorresina de $6\text{ }\mu\text{m}$ de espesor.
4. Alineación de la máscara fotográfica.
5. Exposición de las muestras a la luz ultravioleta (UV). Se colocan sobre un soporte de sujeción con vacío, la oblea, la máscara y un vidrio óptico delgado ($0,1\text{ mm}$ de espesor) a 40 cm de distancia de un iluminador UV desarrollado en el DES. Al colocar la máscara requerida, en las ubicaciones donde es transparente la luz UV se degradará la fotorresina. De esta forma queda establecido el diseño elegido.
6. Revelado de los patrones transferidos. El proceso consiste en sumergir a las obleas en un líquido revelador. Al diluir la fotorresina que ha sido expuesta a la luz.
7. Secado. Las obleas son colocadas en un horno a 100°C durante 3 min. aproximadamente, este proceso se denomina “*post-baking*”.

En la figura 15, se muestra el proceso de fotolitografía.



2.1.5. Depósito de contactos eléctricos

Este proceso consiste en la evaporación de una multicapa de Ti-Pd-Ag en cámara de vacío. En las figuras 16 a18, se observa algunas de las partes del proceso.



Para tener un eficiente contacto eléctrico entre el metal y el emisor n^+ y p^+ se procede a eliminar el óxido producido durante la difusión con una solución de H_2O , HF y NH_4F siendo la velocidad de ataque de $1000 \text{ \AA}/\text{min}$. Seguidamente se procede a la evaporación de los metales en la cámara de vacío, con el mismo procedimiento y parámetros de la evaporación de aluminio.

La evaporación de una multicapa de Ti-Pd-Ag se aprovecha para depositar los contactos metálicos de la parte frontal y posterior. El proceso es realizado dentro de una cámara de vacío posteriormente a una limpieza inicial de los metales que serán usados. La cara posterior la cual no fue expuesta a la luz, el contacto es cubierto por toda la superficie [1].

A causa de su baja altura de barrera, el titanio tiene la ventaja de que pertenece a los metales que se oxidan de forma fácil. De ahí que, alcanza a reducir las capas delgadas de SiO_2 y al mismo tiempo conserva una excelente adhesión al silicio.

Teniendo en cuenta, que el titanio debe ser protegido de la oxidación externa por otro metal, se pueden tomar en consideración metales que por sí mismos difícilmente se corroen y que son compatibles con el material de contacto, en otras palabras, que no se difunden de forma excesiva con el agente de unión y el sucesivo material de recubrimiento.

Por ende, el paladio es un socio adecuado, este se deposita de forma aproximada en el mismo espesor que el titanio. De modo que el contacto externo se debe evaporar una tercera capa de metal que posea una buena conductividad y una mínima corrosión. En la mayoría de los casos se elige la plata. La capa de plata se evapora con un espesor de aproximadamente $0,1 \mu\text{m}$ [3].

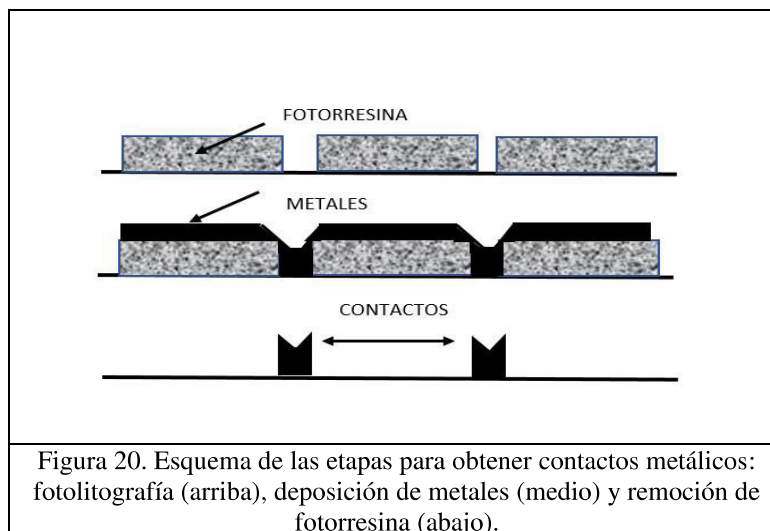
2.1.6. Remoción de la fotorresina

En este proceso se procede a la eliminación del metal excedente. (En la figura 19, se tiene una oblea sumergida en acetona a una temperatura de 85°C).



Figura 19. Remoción de fotorresina.

Posteriormente a la evaporación, se procede a la remoción de la fotorresina con acetona (*lift-off*) y se levanta el metal depositado en las regiones que permanecieron protegidas por la fotorresina, permaneciendo las áreas donde había fotorresina. La cara posterior la cual no fue expuesta a la luz el contacto envuelve toda la superficie [1] [4]. (En la figura 20, se detallan los procesos que se realizan para la elaboración de los contactos metálicos).

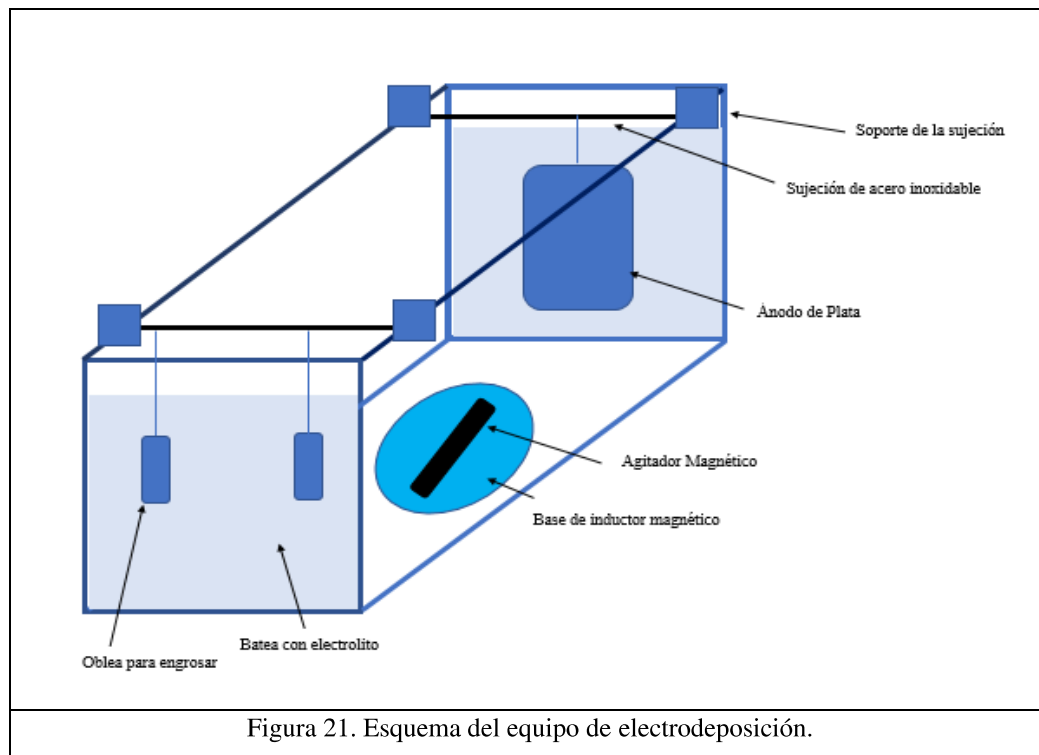


2.1.7. Engrosado de contactos

Es un proceso donde se realiza la electrodeposición de plata (Ag) para lograr llegar a un espesor de 6 a 8 μm . Los contactos metálicos se crecen por electrólisis con el propósito de minimizar las pérdidas de resistencia óhmica y que tengan una característica óptima para la soldadura.

En el proceso de electrodeposición de plata sobre los contactos frontal y posterior se realiza de la forma siguiente. En una cuba de polipropileno, se dispone un cátodo de plata de dimensiones 120 mm x 100 mm x 2 mm y una sujeción de acero inoxidable donde deberá sujetarse las obleas con dos broches como ánodos [1].

La batea posee una solución de cianuro doble de plata (CNAg y CNK) y por la parte inferior de la base se colocó la base de un agitador magnético, el agitador se introduce en la solución, el cátodo pertenece al electrodo de plata y el ánodo corresponde a las muestras (ver Figura 21).



De manera que debe conectarse los contactos positivo y negativo de la fuente de corriente con los electrodos y se efectúa el proceso de electrodeposición. Para obtener el espesor óptimo se debe realizar la inmersión de la oblea durante 12 minutos con 0,5 A de corriente [4].

2.1.8. Tratamiento térmico de los contactos

Luego del proceso de electrólisis, las obleas son sometidas a un tratamiento térmico a 400°C en un ambiente de *forming gas* (mezcla de gases: 4% hidrógeno en 96% de nitrógeno) durante 20 minutos y un caudal de 1 l/min. El recocido asegura una buena adhesión entre las capas metálica, logra un contacto óhmico entre los metales, el silicio y forma una capa pasivante [1].

2.1.9. Corte de sensores

Al finalizar el proceso de elaboración de los sensores, estos se dividen por corte. El equipo de corte posee una interfaz por medio de la cual se configura el proceso, de esta manera, se tiene mayor exactitud en las dimensiones de cada uno de los sensores. En la figura 22 se observa el equipo utilizado.



Figura 22. Equipo de corte de obleas.

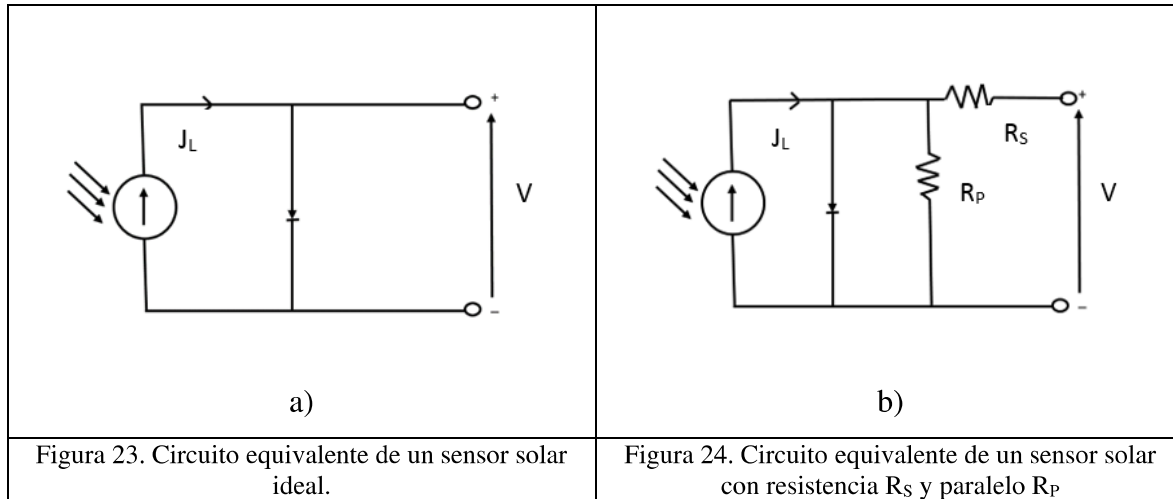
2.2. Caracterización eléctrica de los sensores elaborados

En primer lugar, una caracterización muy importante es la medición de la curva corriente-tensión ($I-V$) de un dispositivo fotovoltaico. A medida que se conoce la curva es posible obtener parámetros característicos [2].

2.2.1. Medición de la curva corriente-tensión

Desde el punto de vista eléctrico, un sensor solar es equivalente a un generador de corriente en paralelo con un elemento resistivo lineal, un diodo (ver Figuras 23 y 24). A causa de la iluminación, el sensor ideal produce una fotocorriente que es proporcional a la intensidad de la luz. Esa fotocorriente es dividida entre el diodo y la carga, en una relación que es dependiente de la resistencia de la carga y de la iluminación.

De modo que, para resistencias más altas, más fotocorriente fluye a través del diodo, lo que produce una mayor diferencia de potencial entre los terminales del sensor, pero una corriente menor a través de la carga.



La potencia del sensor viene dada por:

$$P = IV \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que en los sensores reales la energía se disipa por medio de la resistencia de los contactos y de las corrientes de fuga. Estos resultados son eléctricamente equivalentes a dos resistencias parásitas en serie (R_S) y en paralelo (R_P) (Figura 24).

La resistencia en serie se compone de la resistencia de los contactos, la resistencia de contacto metal - semiconductor, y la resistividad del semiconductor. Se tiene un inconveniente particular en la resistencia en serie, cuando se producen altas densidades de corriente, es el caso de luz concentrada. La resistencia en paralelo se produce de la fuga de corriente a través del sensor, en el contorno de los bordes del dispositivo y entre bordes de distinta polaridad.

Además, las resistencias en paralelo y serie reducen el factor de forma. De ahí que, para un sensor solar eficiente, se desea que R_S sea lo más pequeño posible y R_P lo más grande viable. Puesto que, al incluirse las resistencias parásitas, la ecuación de la corriente total, I ; que circula a través del sensor solar se puede expresar como (ecuación 4) [7]:

$$I = I_f - I_0 \left[e^{\frac{q(V - R_S I)}{kT}} - 1 \right] - I_0^* \left[e^{\frac{q(V - R_S I)}{n k T}} - 1 \right] - \frac{1}{R_P} (V - R_S I) \quad (4)$$

Donde:

I_f es la corriente fotogenerada;

I_0 , la corriente de saturación del diodo ideal ($1 \text{ E}^{-9} \text{ A}$ es el valor característico en el Si);

I_0^* es la corriente debida a la recombinación en la zona de vaciamiento;

R_s y R_p , las resistencias serie y paralelo respectivamente;

V es la tensión externa;

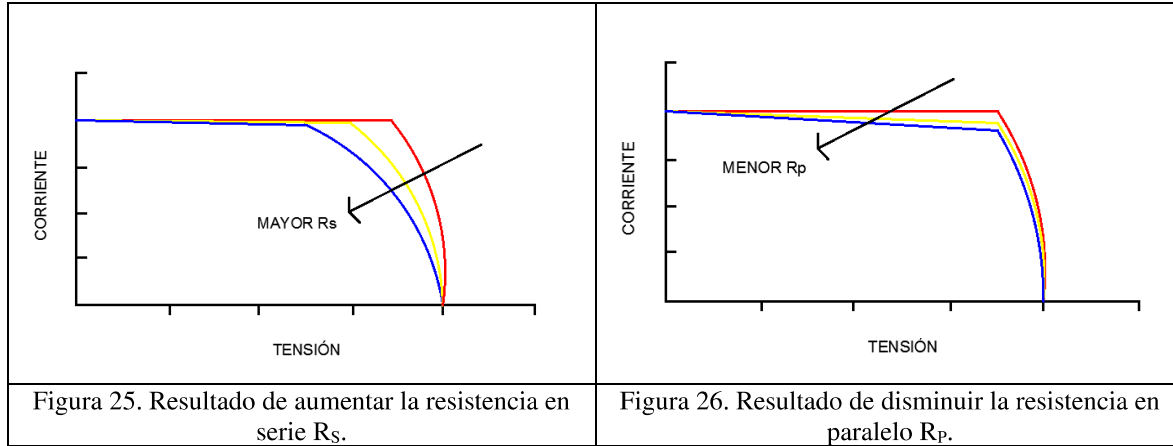
k es la constante de Boltzmann;

T = temperatura en grados Kelvin;

q = es la carga del electrón [C] y,

n es el factor de idealidad del diodo.

En las figuras 25 y 26 se detallan las gráficas de corriente – tensión y la influencia de las resistencias serie y paralelo.



Para la caracterización eléctrica, los principales parámetros a tomar en cuenta en un sensor solar son la corriente de cortocircuito: I_{cc} , tensión de circuito abierto: V_{ca} , factor de forma: FF y la eficiencia de conversión energética η . La curva I-V, proporciona el punto particular I_{cc} , al cual le corresponde un valor de $V=0$. Este de forma ideal, coincide con la corriente fotogenerada I_f .

Para la tensión de circuito abierto, con una $I=0$, resulta (ecuación 5) [8].

$$V_{ca} = \left(\frac{kT}{e} \right) \ln \left(\frac{I_f}{I_0} + 1 \right) \quad (5)$$

El factor de forma es definido por:

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{ca} I_{cc}} \quad (6)$$

Se define la eficiencia de conversión por:

$$\eta = \frac{V_{ca} I_{cc} FF}{P_{in}} \quad (7)$$

Siendo P_{in} , potencia total de la luz incidente sobre el sensor.

En la figura 27, se observa la curva I-V representativa de un sensor solar. La curva de potencia tiene un punto de potencia máxima (P_{max}) que puede entregar el sensor. En el punto (V_{max} , I_{max}), es el punto de operación de la celda fotovoltaica y está directamente relacionado con la P_{max} de salida. En el caso de un sensor solar, el punto de operación es la corriente de cortocircuito ya que es directamente proporcional a la radiación incidente sobre el dispositivo.

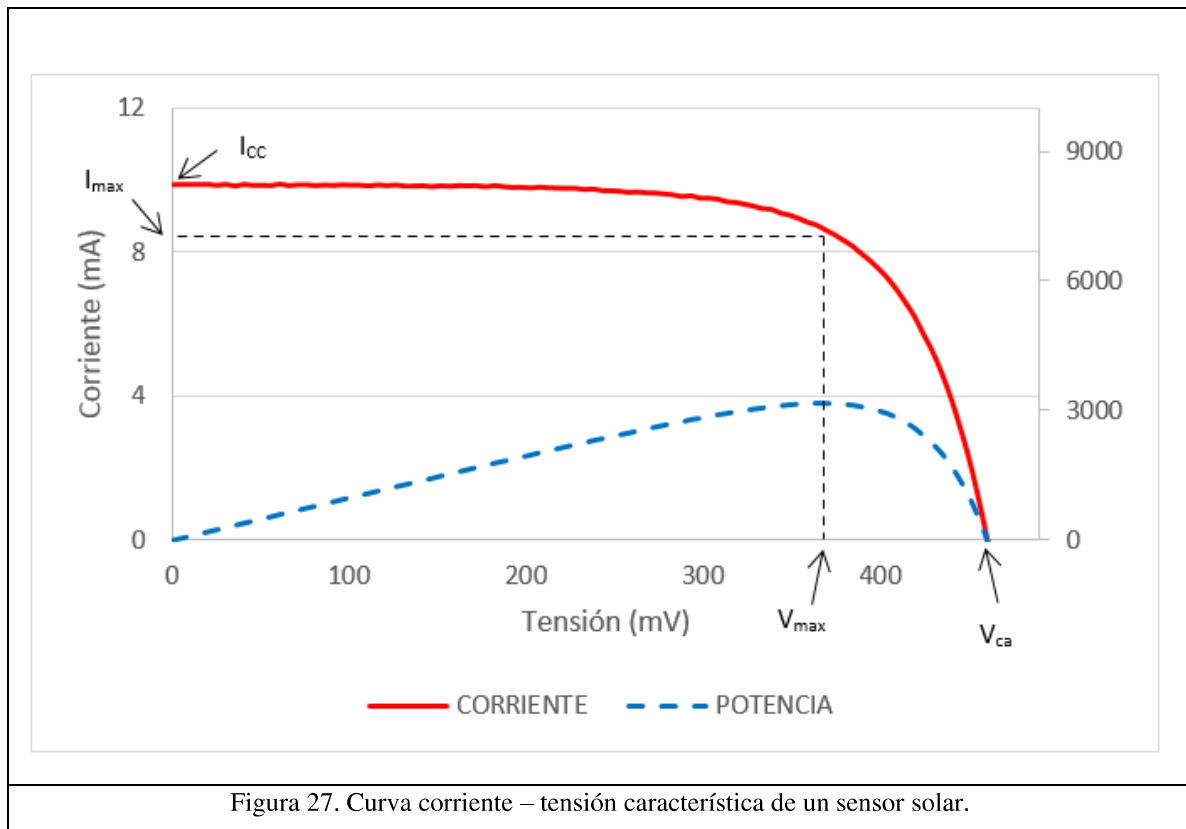


Figura 27. Curva corriente – tensión característica de un sensor solar.

La caracterización eléctrica de los sensores solares se lleva a cabo con la medición de la curva I-V del dispositivo en estado terminado. Esta curva es de elemental importancia para la evaluación del proceso de fabricación.

Utilizando un simulador solar de estado estacionario o pulsado se realizan las mediciones de las características eléctricas de los sensores solares. Se obtienen los parámetros del circuito equivalente: la tensión del circuito abierto, la corriente de cortocircuito, la eficiencia de conversión y factor de forma.

Las normas para dispositivos fotovoltaicos tienen como requisito el uso de clases específicas de simuladores solares considerados aptos para determinados ensayos. El fin primordial es definir la clasificación correspondiente de los simuladores solares para su utilización en medidas en el interior de los dispositivos fotovoltaicos terrestres. El equipo de iluminación a utilizar pertenece a la clasificación clase C de un sol artificial [9].

Para la realización de la medición de la curva corriente-tensión se cuenta con un equipo simulador que posee una cámara de Xenón con un potencial regulable de 300 a 1000 W y una disposición de espejos que reflejan la luz sobre el plano objeto. Además, tiene la capacidad de poder colocarse el filtro con el espectro solar que se requiera, ya sea, AM0, AM1 o AM1.5.

La condición de prueba estándar requiere una intensidad de radiación de 1367 W/m^2 y para ello se establece el uso de una celda calibrada. Para mantener el dispositivo con temperatura controlada a 28°C , se cuenta con una base termostatzada.

La medición se realiza utilizando cuatro puntas (cuatro terminales eléctricos) y una carga electrónica. En la figura 28, se observa el equipo utilizado para la medición de la curva I-V.

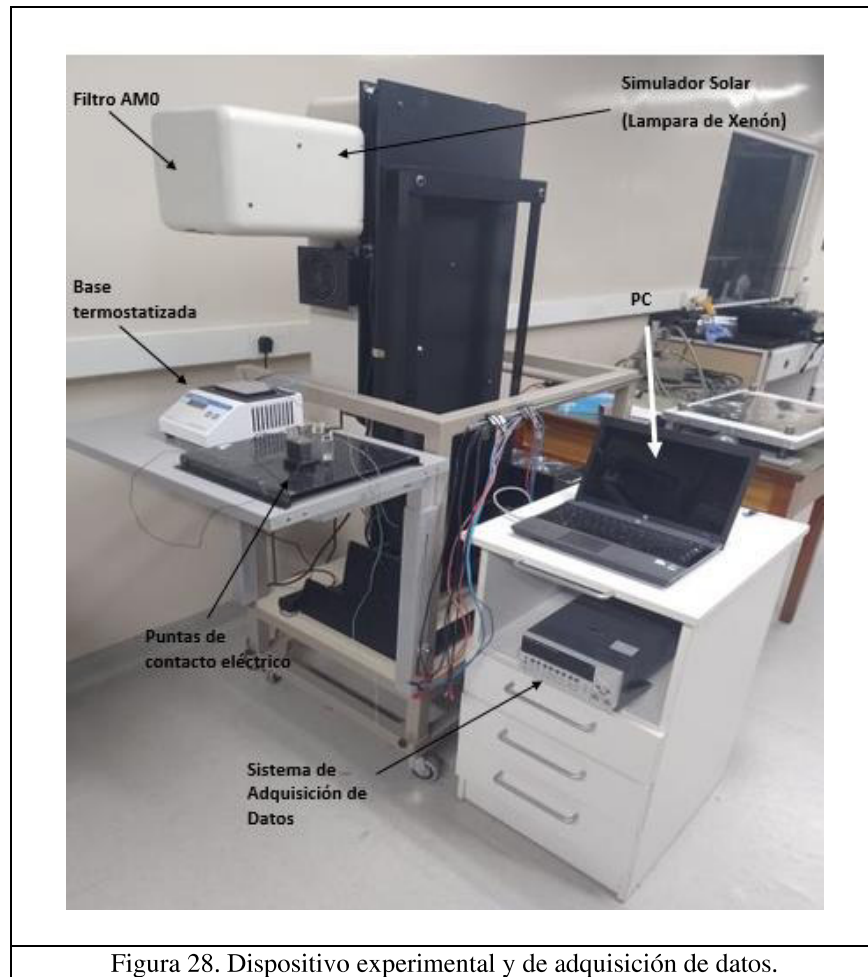


Figura 28. Dispositivo experimental y de adquisición de datos.

2.2.2. Determinación de la respuesta espectral

La respuesta espectral (RE) de una celda solar la caracteriza de forma electrónica. De ella se pueden deducir propiedades como la efectividad de la pasivación de defectos en la superficie frontal y posterior, la calidad del emisor, la obtención de fotones de alta longitud de onda, y la longitud de difusión de portadores minoritarios en la base [9] [10].

La medición de respuesta espectral de una celda solar es equivalente a la medición de la corriente de cortocircuito que genera por unidad de potencia monocromática incidente. Particularmente la condición de polarización eléctrica que debe cumplir de forma característica es la de corto circuito, lo que establece que la diferencia de potencial entre sus contactos es nula. Está condición según lo descrito anteriormente es sencillo alcanzarlo para celdas solares con una juntura como lo que sucede con el silicio cristalino.

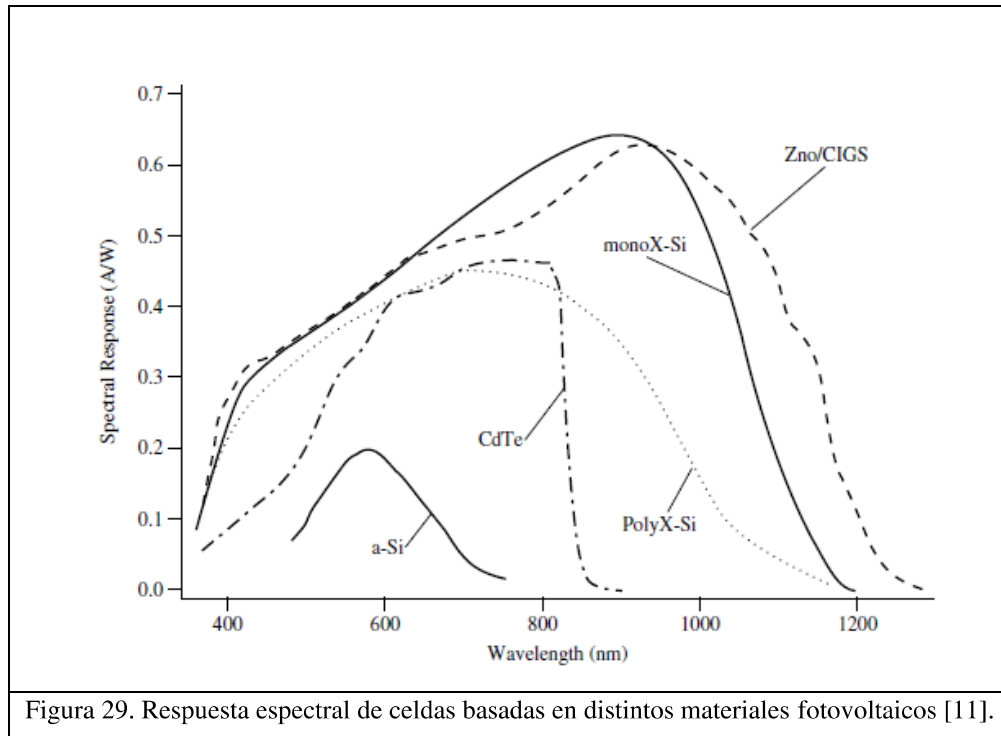
Por otra parte, se debe medir punto a punto, para cada longitud de onda, la potencia de luz monocromática que incide sobre la celda. Se debe utilizar un radiómetro o piranómetro que este calibrado, que cuantifique la intensidad en W/m² de la luz monocromática incidente y asimismo sea muy sensible para irradiancias pequeñas. Esto porque el método de generación de luz monocromática, en general a través de filtros ópticos de banda angosta o monocromadores, suministra un flujo luminoso de baja intensidad, provocando que el funcionamiento sea difícil aplicación [2].

A continuación, debe usarse la corriente de cortocircuito y emplear la ecuación siguiente, para hacer el cálculo de la RE.

$$RE = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{E(\lambda)} \quad (8)$$

Siendo $I_{cc}(\lambda)$ = corriente de corto circuito por longitud de onda, $P_{in}(\lambda)$ = potencia de luz incidente sobre la celda por longitud de onda, $J_{cc}(\lambda)$ = densidad de corriente de la celda por longitud de onda y $E(\lambda)$ = irradiancia de iluminación por longitud de onda [10].

En la figura 29, se observa la curva de respuesta espectral para diferentes materiales.



Al despejar $J_{cc}(\lambda)$ de la ecuación 8, al integrarse en λ [12]:

$$I_{cc} = A * J_{cc} = A \int RE(\lambda) E(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

Con esta ecuación puede obtenerse la corriente de corto circuito que una celda produce en un espectro no establecido $E(\lambda)$ si se tiene primeramente su RE.

La eficiencia cuántica externa (EQE) es determinada por la respuesta espectral:

$$EQE(\lambda) = \frac{hc}{q} \frac{RE(\lambda)}{\lambda} \quad (10)$$

El número de electrones que fluyen en el circuito de corriente externo por unidad de tiempo como fracción del número de fotones incidentes por unidad de tiempo es calculado por la EQE [10]. (En la figura de 30, puede observarse la curva de respuesta espectral típica).

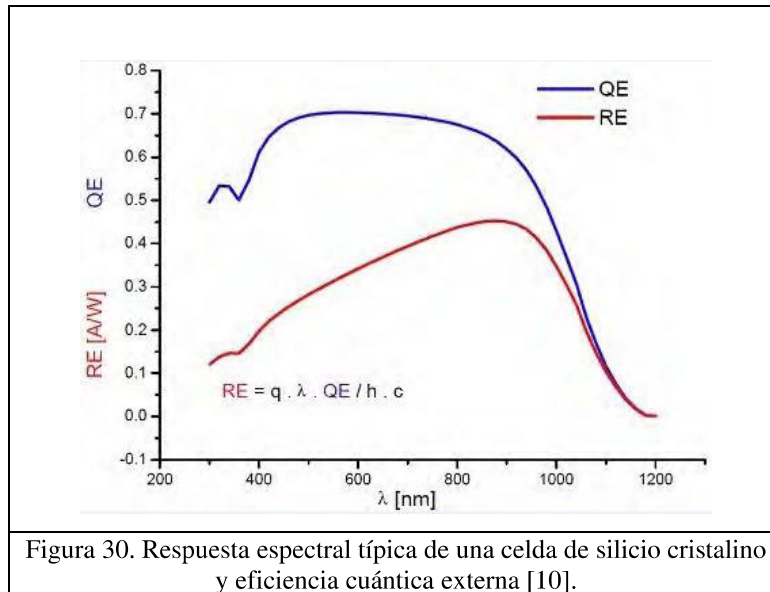


Figura 30. Respuesta espectral típica de una celda de silicio cristalino y eficiencia cuántica externa [10].

Teniendo el valor de la energía que contiene el haz de luz con el cual se ilumina, se determinara la respuesta espectral. De manera que, se puede omitir este requerimiento si RE se estima sobre la base de una celda evaluada desde un principio.

$$RE^{cel}(\lambda) = \frac{A_{cc}^{ref} I_{cc}^{cel}(\lambda)}{A_{cc}^{cel} I_{cc}^{ref}(\lambda)} * RE^{ref}(\lambda) \quad (11)$$

Siendo I_{cc}^{cel} y I_{cc}^{ref} , respectivamente las corrientes de cortocircuito para las celdas de referencia y las que se van a medir. A^{cel} y A^{ref} son áreas activas de las corrientes y finalmente RE^{cel} y RE^{ref} , son sus respuestas espectrales en ese orden [12].

En la medición de la respuesta espectral, es muy importante para comprender la generación, la recombinación y los mecanismos de difusión de los dispositivos fotovoltaicos. El haz con la que se ilumina el dispositivo es producido por una energía contenida y se debe tener conocimiento de está, para la determinación de la RE absoluta.

La RE cuantifica la relación entre la corriente generada y la potencia monocromática incidente en una celda solar. La corriente eléctrica es carga eléctrica por unidad de tiempo y el flujo luminoso es número de fotones monoenergéticos por unidad de tiempo. La eficiencia de conversión fotón/portador de carga de una celda solar es examinada por la RE.

El método normalizado para la evaluación de la RE absoluta o relativa de una celda fotovoltaica lineal tiene como requisito el uso de luz de polarización a la que se superpone el haz monocromático, tomando como base las normas IRAM [13] y ASTM [14] [15]. Para la monojuntura de Si, tiene una corriente de cortocircuito que es lineal con la irradiancia en determinado intervalo.

En la norma IRAM [13], la RE de una celda fotovoltaica es determinada según el procedimiento siguiente:

- Se induce sobre la celda, con incidencia normal, un haz pulsado de luz monocromática. Al mismo tiempo se ilumina la celda en la totalidad de su superficie, con un haz continuo de luz blanca (luz de polarización), de irradiancia similar a aquella que la celda recibe en sus condiciones normales de operación.
- Se produce en la corriente de cortocircuito de salida de la celda una corriente de c (corriente continua) a causa del haz de polarización.
- Al mismo tiempo el haz pulsado monocromático produce una corriente de c_a (corriente pulsada). Con la variación de longitud de onda, se registra la componente de corriente pulsada de la corriente de corto circuito.

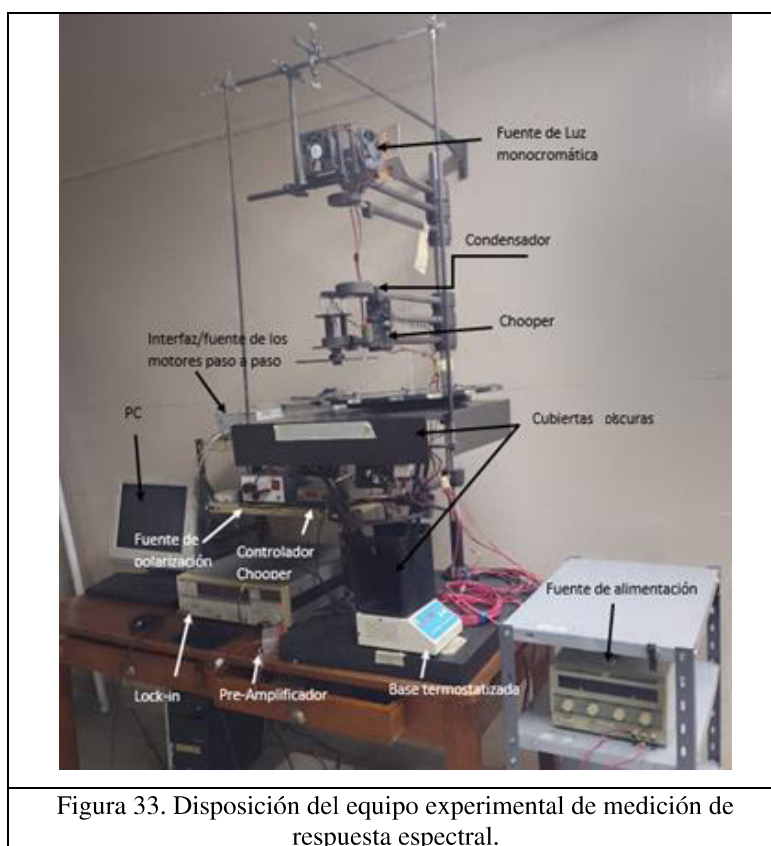
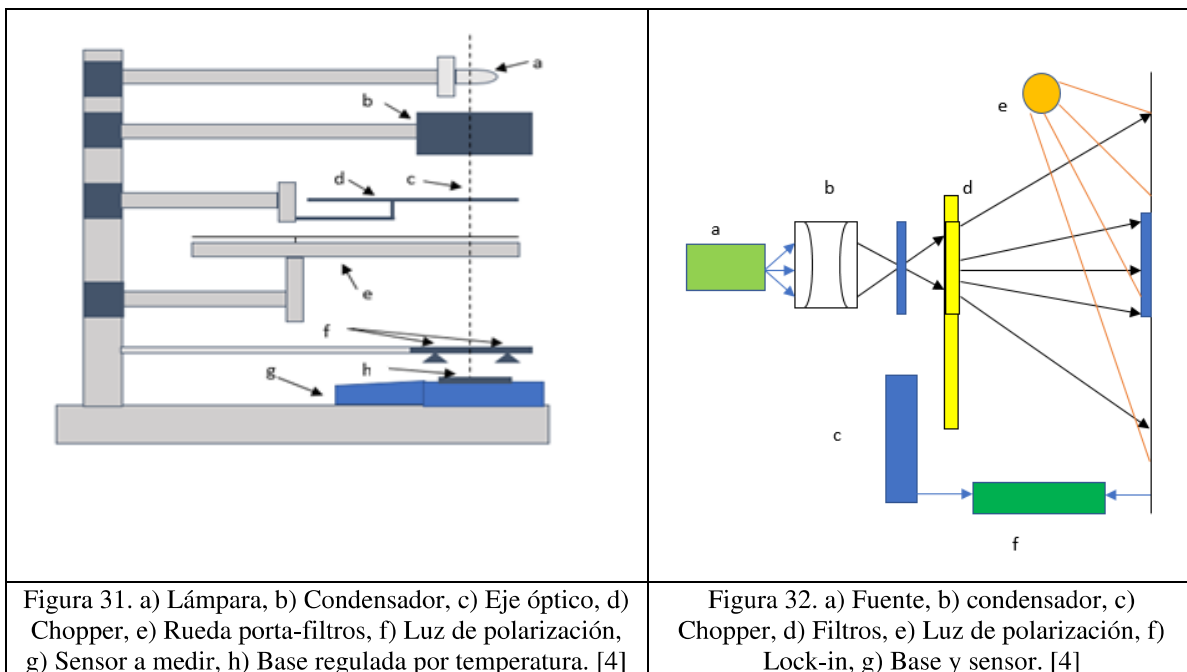
- La determinación de la respuesta espectral absoluta necesita el conocimiento de la cantidad de energía contenida en el haz pulsado, es por esto, que debe medirse con detector calibrado. Por esta razón la respuesta espectral absoluta puede calcularse a partir de la respuesta medida de la celda y la irradiancia de la fuente pulsada.

En el equipo de medición de RE del DES, la luz monocromática se obtiene a partir de la interposición de filtros de interferencia óptica de banda angosta (particularmente 10nm) entre la fuente luminosa de espectro extendido y el sensor a medir. Se dispone de una lámpara de tungsteno de 250 W cuya ventilación es forzada y filtros de interferencia cuadrados de 5,08 cm de lado montados sobre una rueda de Al anodizado específicamente elaborada que permite elegir cada uno de los filtros.

Antes a su paso por los filtros, el haz de luz es acondicionado por un condensador formado por dos lentes plano convexas de cuarzo de tal manera que pueda ser interceptado por el conmutador (chopper) del amplificador lock-in.

La fuente de luz monocromática, el condensador, el conmutador y los filtros están montados sobre una columna en forma alineada, donde la distancia entre la fuente y el plano de medición es tal que garantiza la homogeneidad de la intensidad de la iluminación monocromática dentro de $\pm 2,5 \%$ según lo establecido en la Norma IRAM [13]. La luz de polarización se encuentra dada por una lámpara de tungsteno de 250 W con reflector dicróico y finalmente el sensor a examinar.

En las figuras 31 a 33, se muestra la disposición de los elementos del equipo experimental para la medición de la RE.



Es imprescindible contar con un circuito eléctrico para realizar la medición de la respuesta espectral. Este debe tener la capacidad de colocar el sensor solar en condiciones de cortocircuito, según la figura 34.

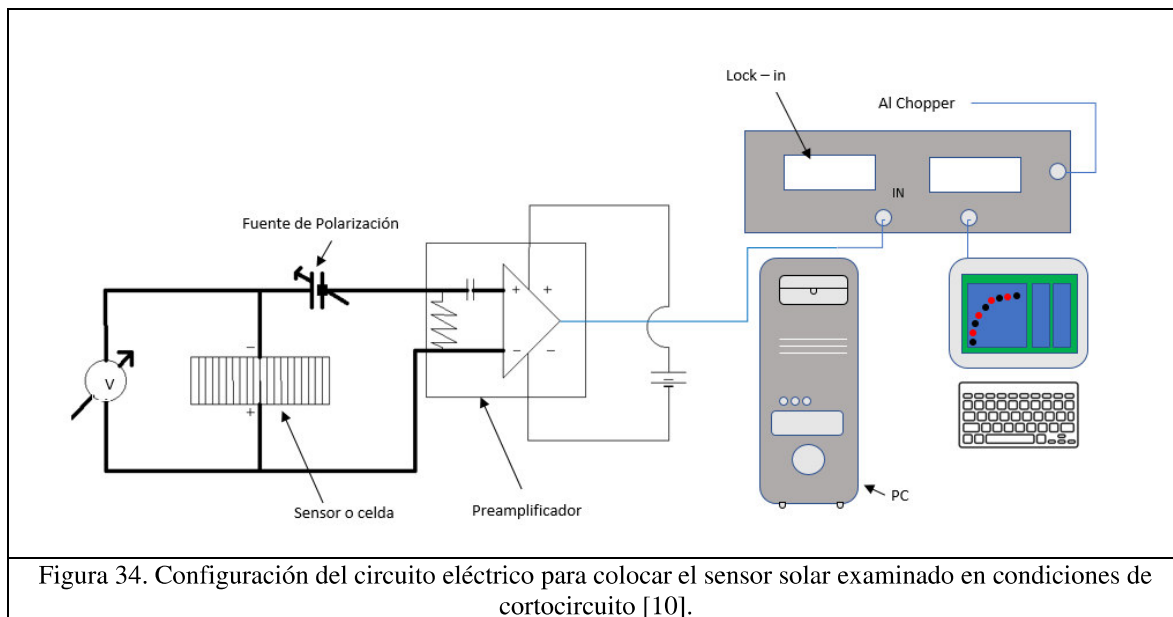


Figura 34. Configuración del circuito eléctrico para colocar el sensor solar examinado en condiciones de cortocircuito [10].

El circuito de la figura anterior se compone de un preamplificador, unido a una resistencia tiene la función de conversión corriente-tensión, de tal forma que el preamplificador entrega en la salida una tensión en proporción a la corriente que circula. La tensión es obtenida por amplificador *lock-in*. Igualmente, el circuito posee una fuente regulable (polarización eléctrica) apropiada para el equipo y un voltímetro en paralelo con el sensor o celda. Por tal razón, facilita la colocación del sensor a examinar en estado de cortocircuito o estado de polarización eléctrica establecidas.

2.2.3. Caracterización estructural de los sensores

En un microscopio electrónico de barrido (*Scanning Electron Microscopy*, SEM) y que posee el sistema de espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (*Energy Dispersive Spectrometer*, EDS), la imagen se construye a partir de las señales emitidas por la muestra y se va formando a medida que el haz de electrones se desplaza sobre una porción de su superficie. Este barrido (*scanning*) se realiza línea por línea sobre una pequeña zona de forma rectangular (*raster*) [16].

En la figura 35, se observa la incidencia de un haz sobre una muestra en el equipo.

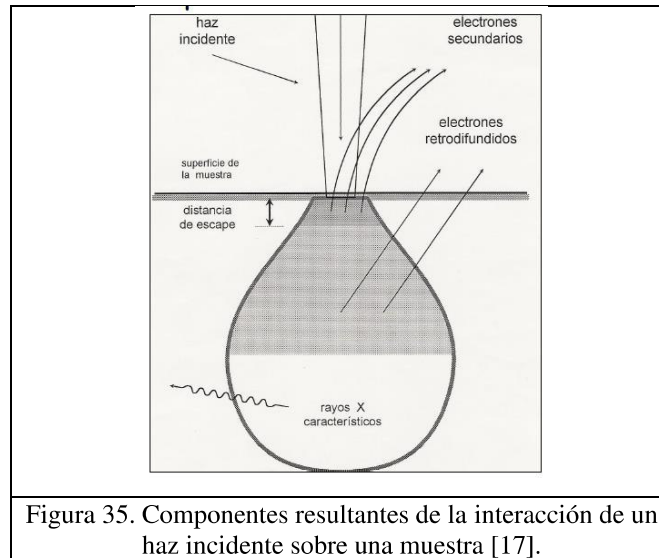


Figura 35. Componentes resultantes de la interacción de un haz incidente sobre una muestra [17].

Los electrones secundarios, producen una señal que es la más utilizada en un microscopio electrónico de barrido. Éstos permiten alcanzar la máxima resolución de imágenes topográficas de una muestra. Esta es la zona es la que se visualiza ampliificada en la imagen final.

En la medida que el haz explora la muestra de esta manera la intensidad de la señal generada varía según el punto propio analizado en cada instante. La señal detectada puede, de esta manera ser analizada y ampliificada, ya sea en su forma analógica como digital, para que se procese de forma conveniente. En la figura 36, se observa una micrografía.

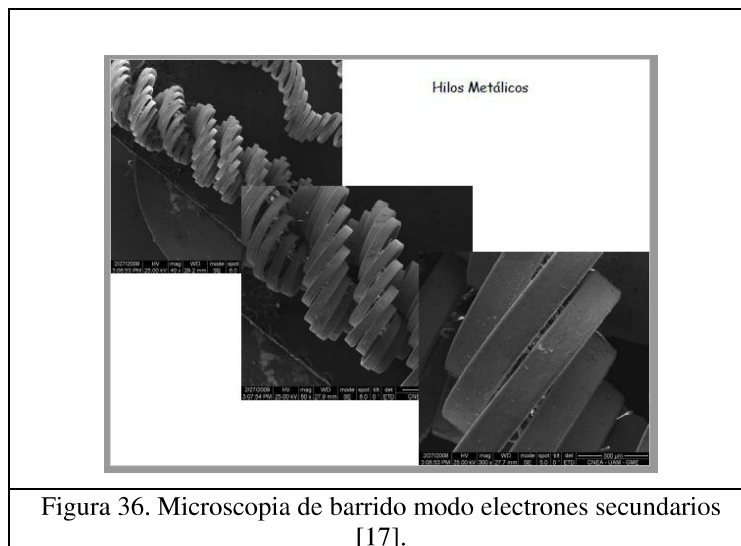


Figura 36. Microscopia de barrido modo electrones secundarios [17].

Además, el análisis de los rayos x característicos emitidos por una muestra alcanzada por el haz de electrones de alta energía de un microscopio electrónico de barrido o una microsonda electrónica permite la identificación de los elementos que componen dicha muestra.

La identificación de los elementos presentes en una muestra se basa en la determinación de las energías E , o de las longitudes de onda λ de los fotones X característicos emitidos [17]. Ambas magnitudes caracterizan unívocamente la radiación emitida por los elementos presentes en la muestra y están expresados por la relación clásica:

$$E(keV) = \frac{12,398}{\lambda (A^\circ)} \quad (12)$$

En el microanálisis dispersivo en energía (EDS: *Energy Dispersive Spectroscopy*) los rayos X característicos emitidos por la muestra son detectados por un sistema que produce pulsos de altura proporcional a la energía de cada fotón incidente. Estos pulsos electrónicos son luego procesados por un analizador multicanal y finalmente visualizados en un espectro que grafica la cantidad de pulsos en función de la energía característica de cada pulso.

De esta manera, con el sistema dispersivo en energía, se puede identificar de forma rápida los elementos presentes en una muestra si su concentración es mayor a $\approx 1\%$. Con la medición adicional de la intensidad de los rayos X característicos y procesos de cálculo adecuados también es posible analizar en forma cuantitativa la composición de la zona analizada. La principal ventaja de las técnicas de microanálisis es el pequeño volumen del material que es analizado en general del orden del mm cúbico o $1E^{-12} \text{ cm}^3$ [17].

En la figura 37, se muestran con dos monitores en paralelo una micrografía y su espectro de una zona puntual de la muestra.

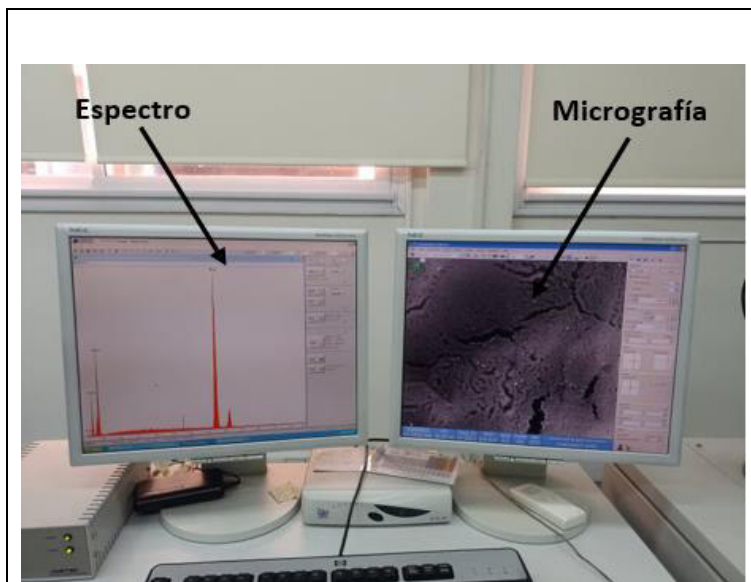


Figura 37. Espectro de energía y micrografía de posición puntual de sensor.

En la figura 38 y 39 se muestra la distribución del equipo (ESEM: *Environmental Scanning Electron Microscope*) y sistema EDS. Es un microscopio de barrido ambiental, que es variante del SEM. Permite el análisis de muestras no conductoras y húmedas. En los monitores se pueden observar las micrografías y los espectros de las muestras analizadas, luego del procesamiento de los datos analíticos de la muestra estudiada.

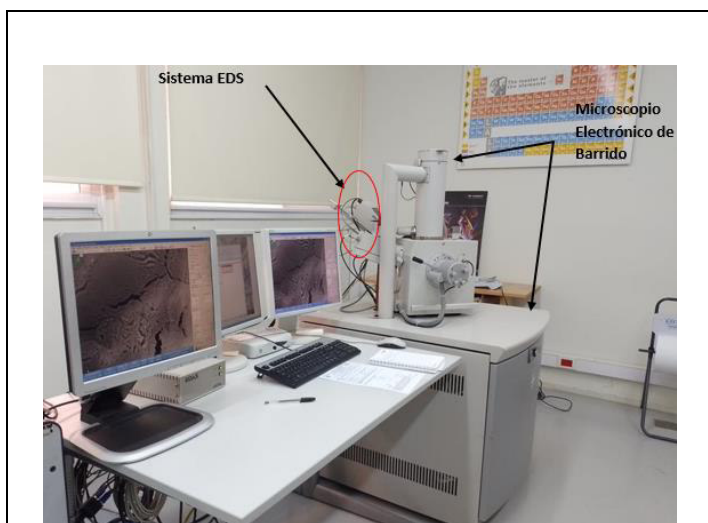


Figura 38. Microscopio electrónico de barrido – Departamento de Microscopia electrónica, Gerencia de Materiales CAC.



Figura 39. Equipo FEI - ESEM QUANTA 200.

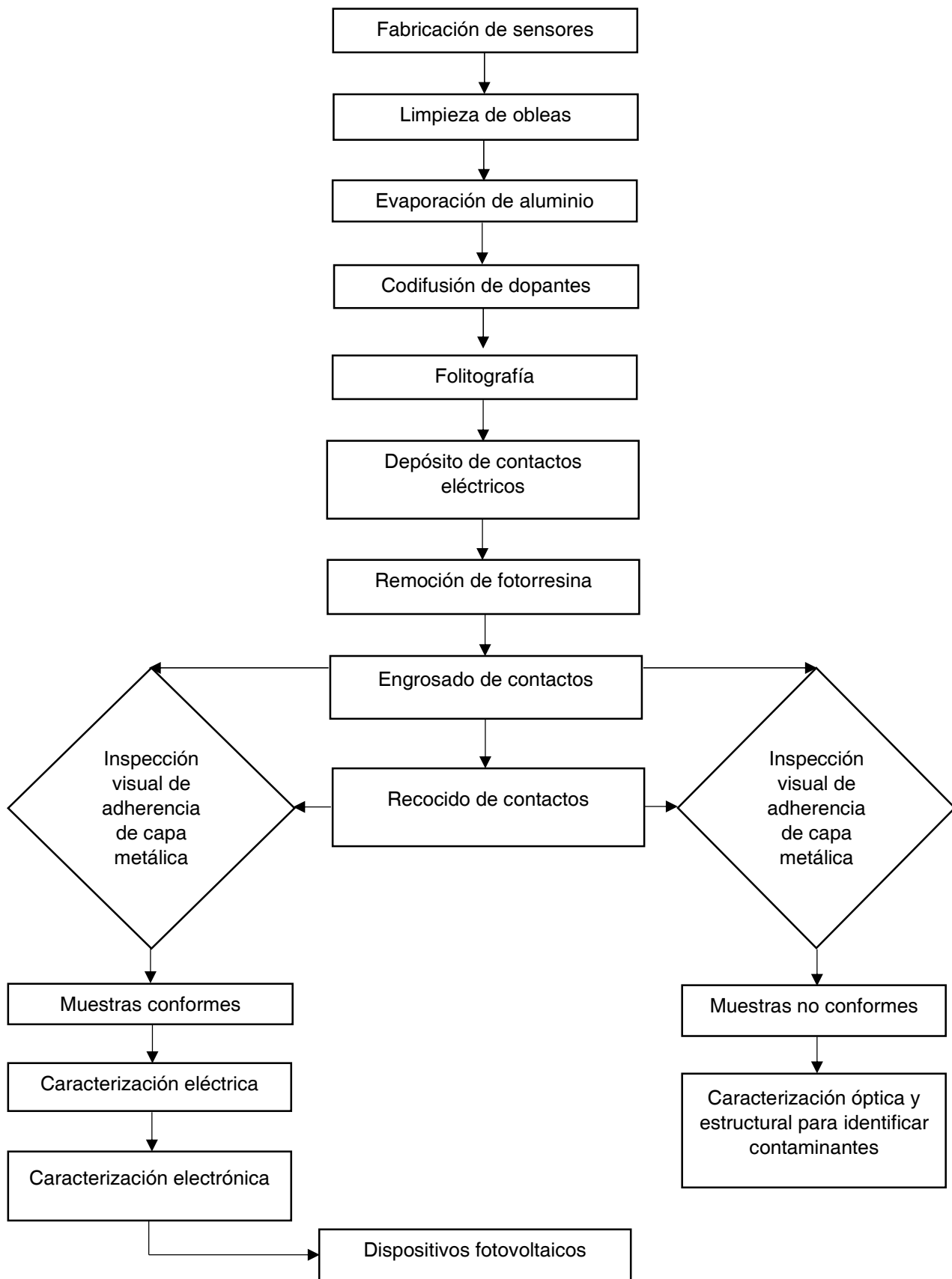


Figura 39. Diagrama de flujo de elaboración de sensores solares

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martínez Bogado, M. G. (2004). Diseño, elaboración, caracterización y ensayos de dispositivos fotovoltaicos para usos espaciales [Tesis de Doctorado, UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN]. Páginas 102, 103,104, 107, 108.
- [2] Socolovsky, P. (2015). Caracterización y elaboración de dispositivos fotovoltaicos para uso espacial [Disertación Doctoral, Universidad Nacional de General San Martín, Argentina]. Páginas 42-47, 55-61, 104, 155.
- [3] Goetzberger, A. Knobloch, J. Voss, B. (1998) Crystalline Silicon Solar Cells. Páginas 155, 157, 158, 159.
- [4] Kondratiuk, N. (2016). Diseño, desarrollo, elaboración y caracterización de sensores fotovoltaicos de radiación UV. [Tesis de Licenciatura, UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES]. Páginas 17-24, 30.
- [5] Ghandi, S. (1994). VLSI Fabrication Principles. Silicon and Gallium Arsenide. Páginas 213, 214, Capítulo 10.
- [6] Tamasi, M. J. (2003). Celdas Solares para Uso Espacial: Optimización de Procesos y Caracterización [Tesis de Doctorado, UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN] Páginas 65, 66, 68.
- [7] Nelson, J. (2003). The Physics of Solar Cells. Reino Unido, Imperial College Press. Páginas 24-28.
- [8] Green, M. (1982). Solar cells: Operating Principles, Technology and System Applications. Páginas 79-81.
- [9] Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2007). Dispositivos Fotovoltaicos. Parte 9: Requisitos De Funcionamiento Para Simuladores Solares. NTE INEN-IEC 60904-9 (2a Edición 2014-01)
- [10] García, J. (2011). Respuesta espectral en celdas solares multijuntura de estructura monolítica basadas en semiconductores III-V. [Disertación Licenciatura, Universidad de Buenos Aires, Argentina]. Páginas 24-27, 31, 37.

- [11] Randall, J. (2005). Designing Indoor Solar Products. Photovoltaic Technologies for AES. Página 72.
- [12] Saint André, S. (2017). Caracterización y fabricación de celdas solares basadas en compuestos III-V para aplicaciones espaciales [Disertación Licenciatura, Universidad de Buenos Aires, Argentina]. Páginas 35, 36.
- [13] Norma Argentina IRAM 210013-12. Método normalizado para la medición de la respuesta espectral de celdas fotovoltaicas, 2000.
- [14] Norma ASTM N° E 1021-84, Standard methods for measuring the spectral response of photovoltaic cell, 1984.
- [15] Norma ASTM N° E 297-84, Solar simulation for photovoltaic application testing, 1984
- [16] Cátedra Microscopía Electrónica y Microanálisis (Apuntes cursada de Maestría de Ciencia y Tecnología de Materiales) Instituto Sábato, 2020.
- [17] Ipohorski, M., Bozzano, P. (2013). Microscopía Electrónica de Barrido en la Caracterización de Materiales. Ciencia e Investigación, 63(3), 45-53.

CAPÍTULO 3

OPTIMIZACIÓN DE CONTACTOS METÁLICOS

3.1. Problemática para resolver

En el proceso de elaboración de sensores solares para aplicaciones espaciales, en la etapa de engrosado de contactos por electrodeposición de plata, los contactos metálicos son sometidos a un aumento de su espesor entre 6 a 8 μm con el fin cumplir con las especificaciones técnicas de soldadura. Luego, en la etapa de recocido de contactos, se realiza un tratamiento térmico a 400 °C en un ambiente de *forming gas*; este proceso tiene por objetivo lograr una buena unión (contacto óhmico) entre los metales, el silicio y la formación de una capa protectora pasivante.

Posteriormente a la etapa de engrosado de contactos o luego del proceso de recocido se puede presentar una falta de adherencia del recubrimiento de plata en forma de descascaramiento y ampollamiento. Esta no conformidad en el proceso se produce indistintamente en una u otra etapa, implicando que los sensores solares con esta deficiencia sean rechazados. Esta condición se obtiene en ocasiones, siendo un porcentaje bajo de muestras, pero se busca optimizar el proceso y minimizar el descarte de los sensores fabricados.

El objetivo específico es analizar y determinar cuáles pueden ser las causas que provoquen la falta de adhesión en el proceso de elaboración de sensores solares particularmente en las etapas engrosado y recocido de contactos. En la fabricación de sensores fotovoltaicos, los procesos de limpieza de obleas de silicio, evaporación de aluminio, difusión de dopantes, fotolitografía, depósito de contactos, remoción de fotorresina (*lift-off*), cada uno de ellos, se realizaron eficientemente, sin presentar ninguna anomalía, para el avance en su elaboración.

En la figura 1, se muestran cuatro obleas de sensores luego de la finalización del proceso de electrodeposición de plata, con vista de la grilla frontal. Es importante mencionar que este grupo de sensores presentó ampollado luego de la etapa de engrosado de los contactos metálicos. La mayoría de los defectos en forma de burbuja son visibles, pero para observar e inspeccionar la superficie dañada minuciosamente, se deben utilizar microscopios ópticos y/o electrónicos. El proceso no alcanzó la etapa de recocido.



Figura 1. Vista de la grilla frontal de cuatro obleas con sensores solares luego del proceso de engrosado de contactos.

En la figura 2, pudo observar las cuatro obleas de la Figura 1 vistas de la cara posterior, donde éstas presentan un grado avanzado de ampollado. La concentración se presenta en mayor o menor volumen, asimismo aparecen en distintas posiciones de las superficies de la cara posterior de las muestras. En esta imagen se confirma a simple vista los defectos en la superficie y la no adherencia de la capa de plata. Como resultado de este proceso de fabricación, al grupo de sensores que mostraron esta disconformidad se les descartó totalmente.



Figura 2. Vista de la cara posterior de los sensores.

Teniendo en cuenta que al presentar ampollas posteriormente a la etapa de engrosado de contactos, con facilidad se produce desprendimiento y/o pérdida del recubrimiento de las muestras. La figura 3, muestra una oblea de sensores, con falta de adhesión, se arrancó la capa con la mínima fuerza aplicada, no cumpliendo las características físicas esperadas para su uso.

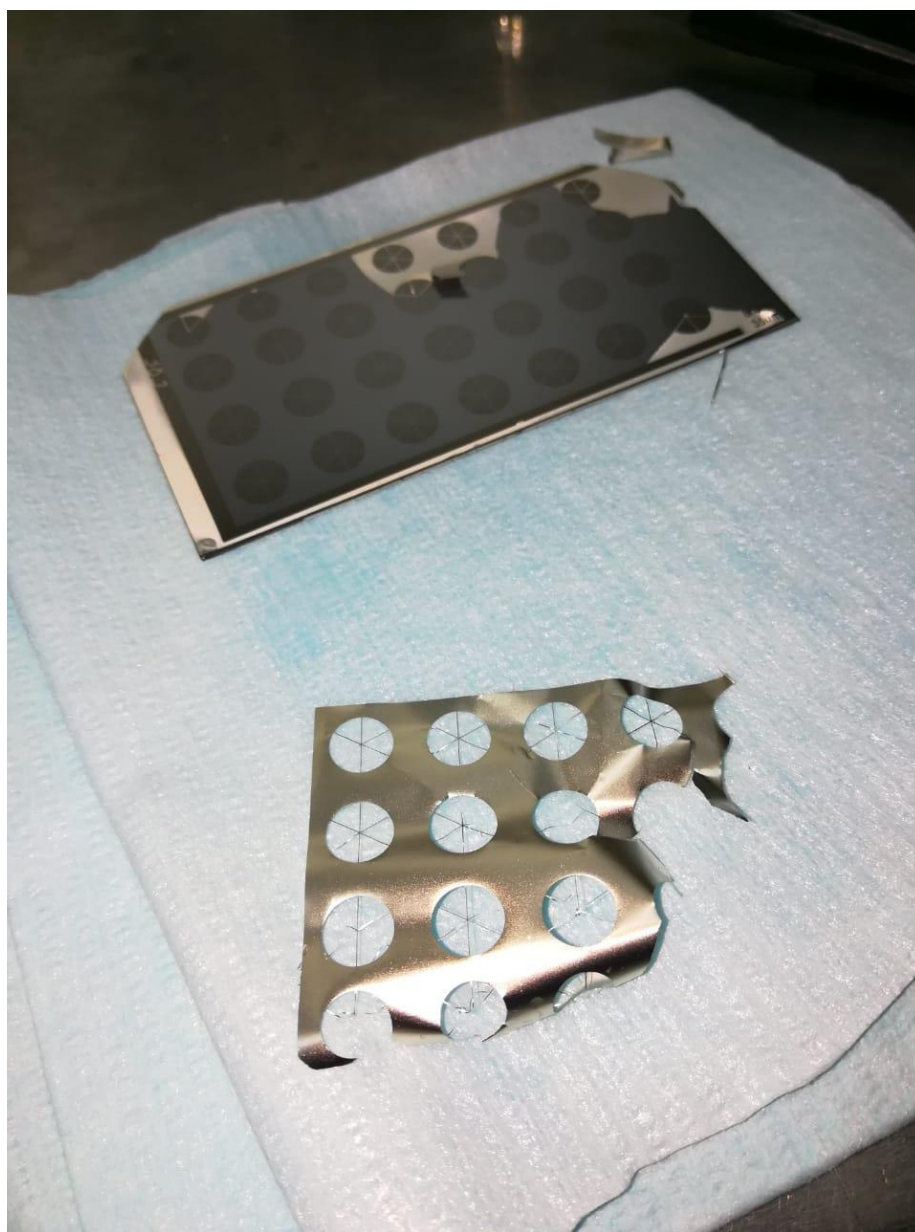


Figura 3. Sensores con la grilla frontal desprendida.

3.2. Hipótesis de trabajo

Para hacer más eficiente la elaboración, caracterización y optimización de técnicas de deposición de contactos metálicos en sensores solares, y maximizar la conformidad se contempla la siguiente hipótesis de trabajo:

- Realizar mejoras al sistema de sujeción de muestras, las cuales se componen de varillas de acero inoxidable y broches. Los soportes del sistema de colocación de muestras y la instalación eléctrica de alimentación de corriente del equipo de electrodeposición. Se puede optimizar la etapa de engrosado de contactos al minimizar el riesgo de algún daño de las obleas cuando se manipulan en el proceso de sujetarlas a los broches. Además, asegurar y fijar los contactos eléctricos para garantizar la circulación de corriente proveniente de la fuente de alimentación. De esta manera maximizar el número de muestras aceptadas al finalizar esta etapa.
- Evaluar los contactos metálicos. Se propone realizar el análisis de las muestras que presentaron no conformidades, las cuales se estudiarán empleando un microscopio electrónico de barrido (*Scanning Electron Microscopy, SEM*) y se analizarán las mismas por la técnica de espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (*Energy Dispersive Spectrometer, EDS*). El objetivo es determinar la existencia de contaminantes que provoquen la falta de adherencia de los contactos metálicos.

3.3. Desarrollo de prototipos

Los prototipos fueron realizados tomando en consideración requerimientos de una sujeción de obleas firme y segura, para que la manipulación del sistema sea más eficiente. Además, los soportes y sistema eléctrico se elaboran en función del nuevo sistema de fijación. realizado.

En la figura 4 se observa el modelo del sistema de colocación de muestras, se realiza con varillas de acero inoxidable, las cotas están dadas en centímetros, esto es estándar para todas las dimensiones indicadas.

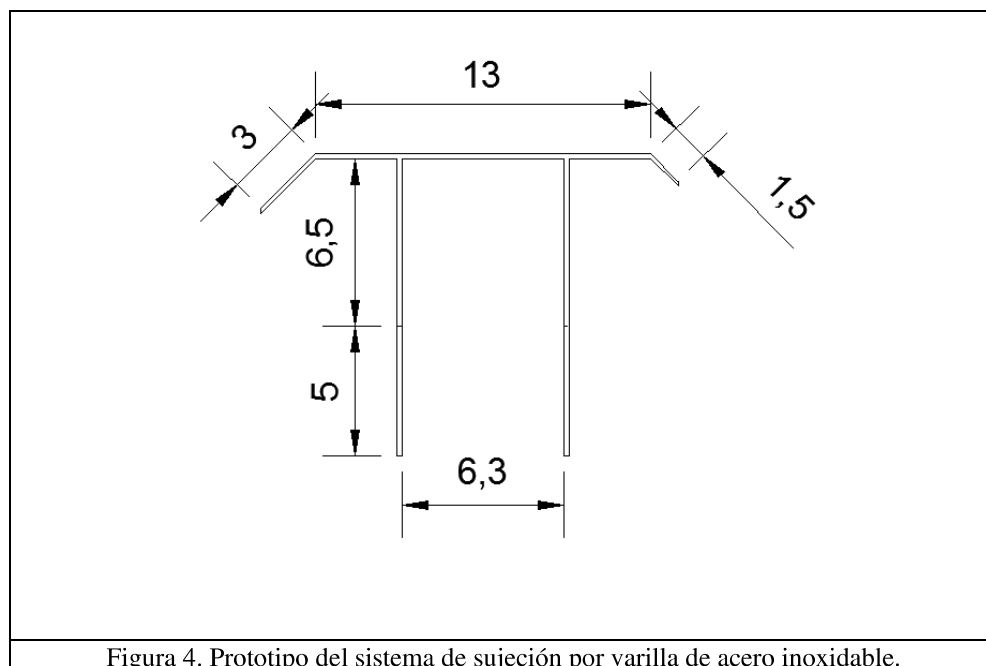


Figura 4. Prototipo del sistema de sujeción por varilla de acero inoxidable.

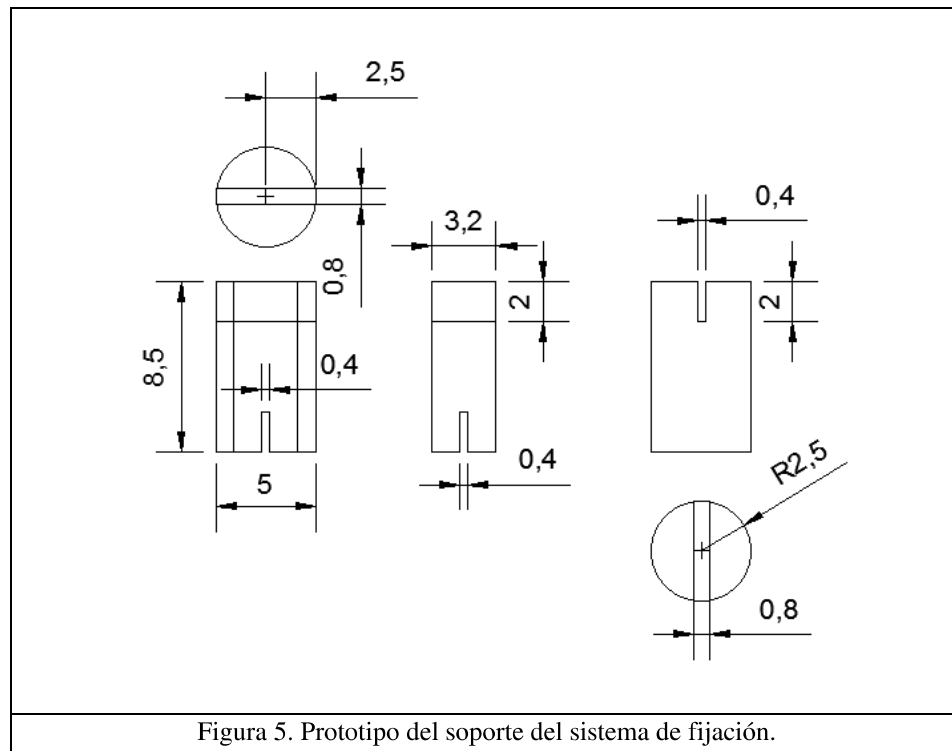
Los aceros inoxidable, son aleaciones o mezclas de dos o más metales puros y/o elementos no metálicos. Los aceros son inoxidable porque tienen cromo, en una cantidad superior al 10% hasta valores del orden del 30%. El cromo es un metal reactivo y se combina con el oxígeno del aire o en cualquier otra condición para formar una película sobre el acero inoxidable que lo aísla del medio agresivo.

La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable es el resultado de la presencia de una fina, densa (no porosa), continua, no insoluble, adherente, tenaz, autoregenerante e impermeable capa de óxido hidratado de cromo en la superficie de estos aceros que impide, una vez formada esta, el contacto del acero con el medio oxidante. A esta condición se le llama pasivación y la película formada es inerte a las condiciones oxidantes del ambiente [1].

En lo que respecta al proceso de electrodeposición de plata, el sistema de fijación de acero inoxidable está inmerso en una solución de cianuro de plata. Dicho sistema está libre de algún daño por corrosión en el proceso electroquímico.

Para el prototipo de diseño de los soportes del sistema de sujeción, se eligió material de poliamida de nylon, la cual es rígida, se puede mecanizar, devastar para proporcionar una determinada forma y las características requeridas (Figura 5. Se utilizó una barra del material para

fabricar los dos soportes los cuales poseen las mismas dimensiones, se mecanizaron y devastaron para llegar a obtener la geometría esperada.



En la figura anterior se muestran las cotas de las dimensiones de los soportes, se mecanizo la barra, se devastó material para realizar las ranuras y reducir su diámetro, utilizando una máquina fresadora del DES. Se tiene una ranura superior donde se colocará la sujeción y una ranura inferior donde se instalará sobre el perímetro de la batea.

En los apoyos, la función de la ranura superior es la de colocar un tramo de la varilla del sistema de sujeción para fijarla y la ranura inferior es la de ubicar y ajustar a la periferia de la batea. Ambos soportes forman parte integral del sistema de colocación de obleas.

3.3.1 Proceso de fabricación del sistema para colocación de obleas y soportes

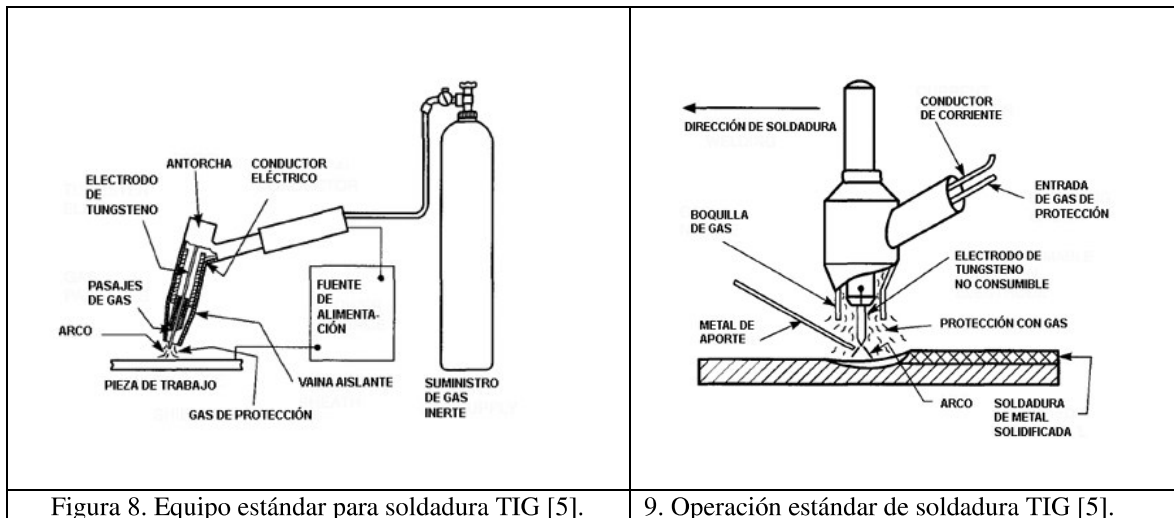
La soldadura por arco con electrodo de tungsteno y gas de protección (GTAW, *Gas Tungsten Arc Welding*) es un proceso de soldadura por el cual se genera entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y la pieza a ser soldada. El proceso se usa con un gas de protección. Puede usarse con o sin adición de metal de aporte. El proceso GTAW se denomina comúnmente

TIG (*Tungsten Inert Gas*) [2]. La soldadura TIG se forma únicamente por fusión de los metales principales y no se ha introducido ninguna varilla o alambre de aporte adicional en el cordón de soldadura [3]. Esta soldadura es de baja corriente, es muy adecuada para la soldadura de precisión de aleaciones inoxidables, en este caso, acero inoxidable [4].

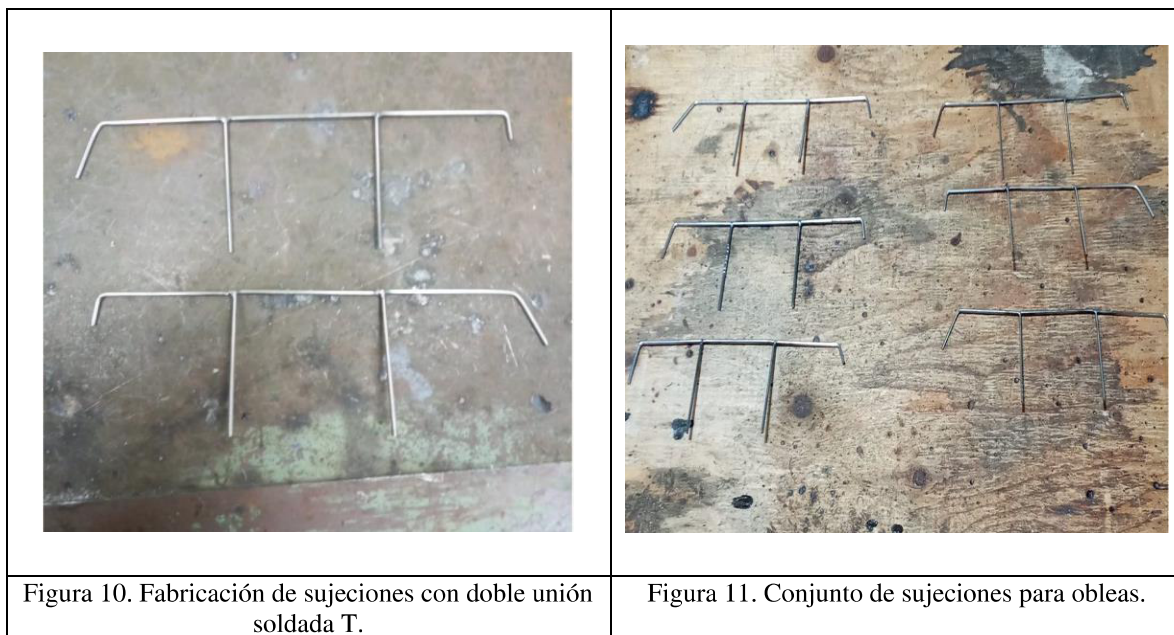
En la figura 6, se muestra el equipo de soldadura del departamento Energía Solar y en la figura 7 se muestra el sistema de sujeción de acero inoxidable, con las juntas realizadas para la unión entre secciones de varillas.

	
Figura 6. Equipo de soldadura TIG.	Figura 7. Sistema de fijación de obleas con dos uniones soldadas en forma de T.

En la figura 8, se especifica el equipo de soldadura TIG, que comprende el cilindro de gas inerte, la fuente de alimentación y la antorcha de soldadura con el electrodo de tungsteno. La figura 9, se refiere a la aplicación de soldadura TIG, indicando la dirección de avance de la soldadura, la pieza de trabajo, la posición de la antorcha y el cordón formado.



En las figuras 10 a 11 pueden observar los sistemas de colocación de obleas fabricados empleando el equipo de soldadura TIG, herramientas de mecánica de banco entre ellas prensa y martillo, disponibles en el DES.



Para la elaboración de los sistemas de fijación de obleas, se realizaron los siguientes procesos:

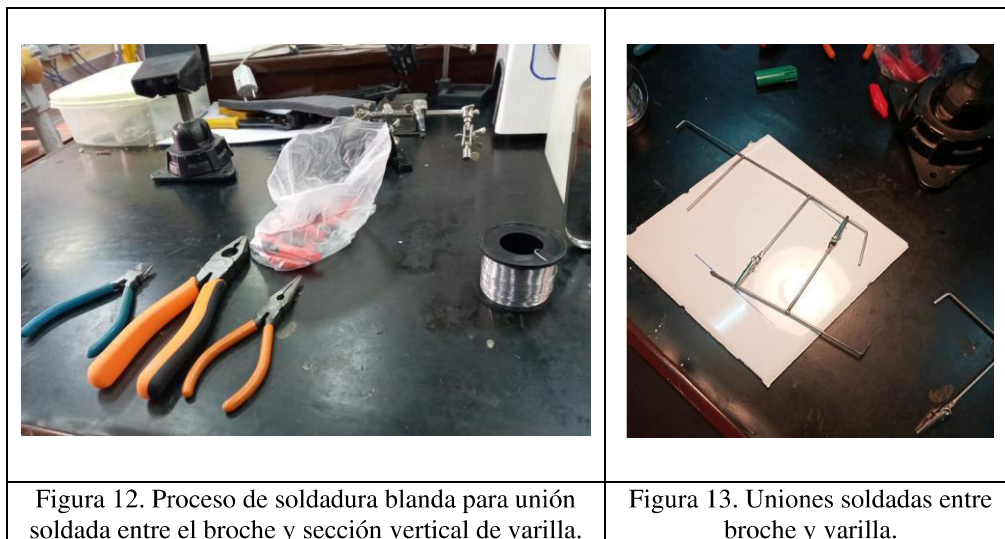
- Doblado de varilla, sección horizontal, un extremo es para asegurar el sistema en un soporte y mantenerlo fijo.

- Doblado de varilla, sección horizontal, El otro extremo tiene un doblez, para asegurar el sistema de sujeción y a la vez ser un punto de contacto eléctrico con la fuente de corriente.
- Dos uniones soldadas por medio de soldadura TIG, siendo estas la unión de la varilla de sección horizontal con dos secciones verticales.

Al tener el sistema de colocación de muestras con la sección horizontal y las secciones verticales con las juntas soldadas, se utilizó soldadura blanda (*soldering*). Ésta se realiza principalmente con un soldador y aleaciones de baja temperatura. La característica más común de una aleación es que su temperatura de fusión es siempre más baja que cualquiera de sus partes constituyentes. [6].

La soldadura blanda consiste generalmente, en la aportación de aleaciones de estaño y plomo, su punto de fusión depende de las proporciones relativas de estos metales en la aleación. Los porcentajes de estaño en la aleación producen una soldadura alta en estaño y soldadura baja en estaño. El estaño utilizado para soldar es en sí una aleación, estaño y plomo con agregado de resina para hacer más fácil el proceso de soldadura [7].

En las figuras 12 y 13, se observa, la unión entre las secciones verticales del sistema de sujeción y los broches donde se fijarán las muestras. Para realizar el proceso de soldadura blanda, se utilizó un soldador con control de temperatura, fundente y alambre de estaño.

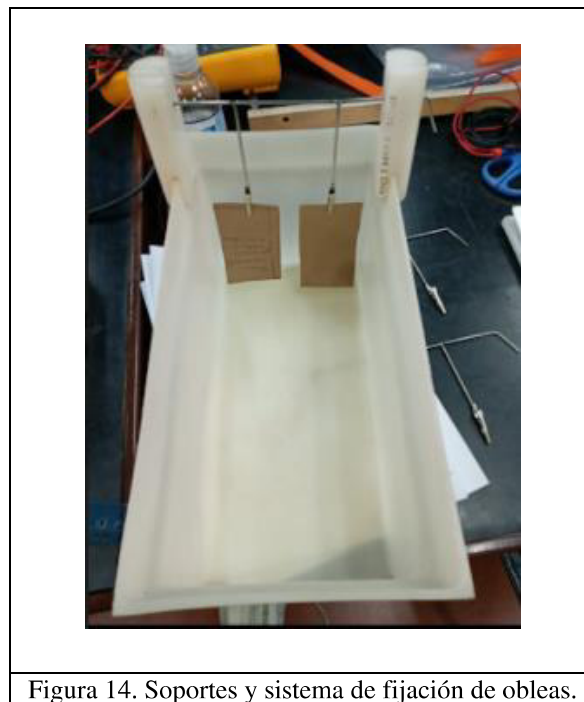


El sistema de fijación de obleas se compone de uniones por soldadura TIG entre varillas y soldadura blanda entre varilla y broche. El broche tiene una longitud aproximada de 5 cm. El diámetro de la varilla es de 2,5 mm.

Los soportes se cortaron de secciones de una barra de poliamida de nylon. El mecanizado de los soportes se realizó en el taller mecánico del DES, se utilizó la sierra de ingletadora para cortar las secciones de la barra, la fresadora para reducir el diámetro de las secciones cortadas. Adicionalmente se usó equipo de mecánica de banco para la elaboración de las ranuras superior e inferior de los soportes.

El proceso de mecanización contempló la elaboración de la ranura inferior. Se tomó una sección de la periferia de la batea para fijar el soporte. La ranura superior del soporte se realizó en función de las varillas del sistema de colocación, para situarlas de forma horizontal en los apoyos. También, se dejó una holgura en esta ranura para hacer de forma fácil y eficiente el proceso de colocación del sistema con las obleas sujetadas.

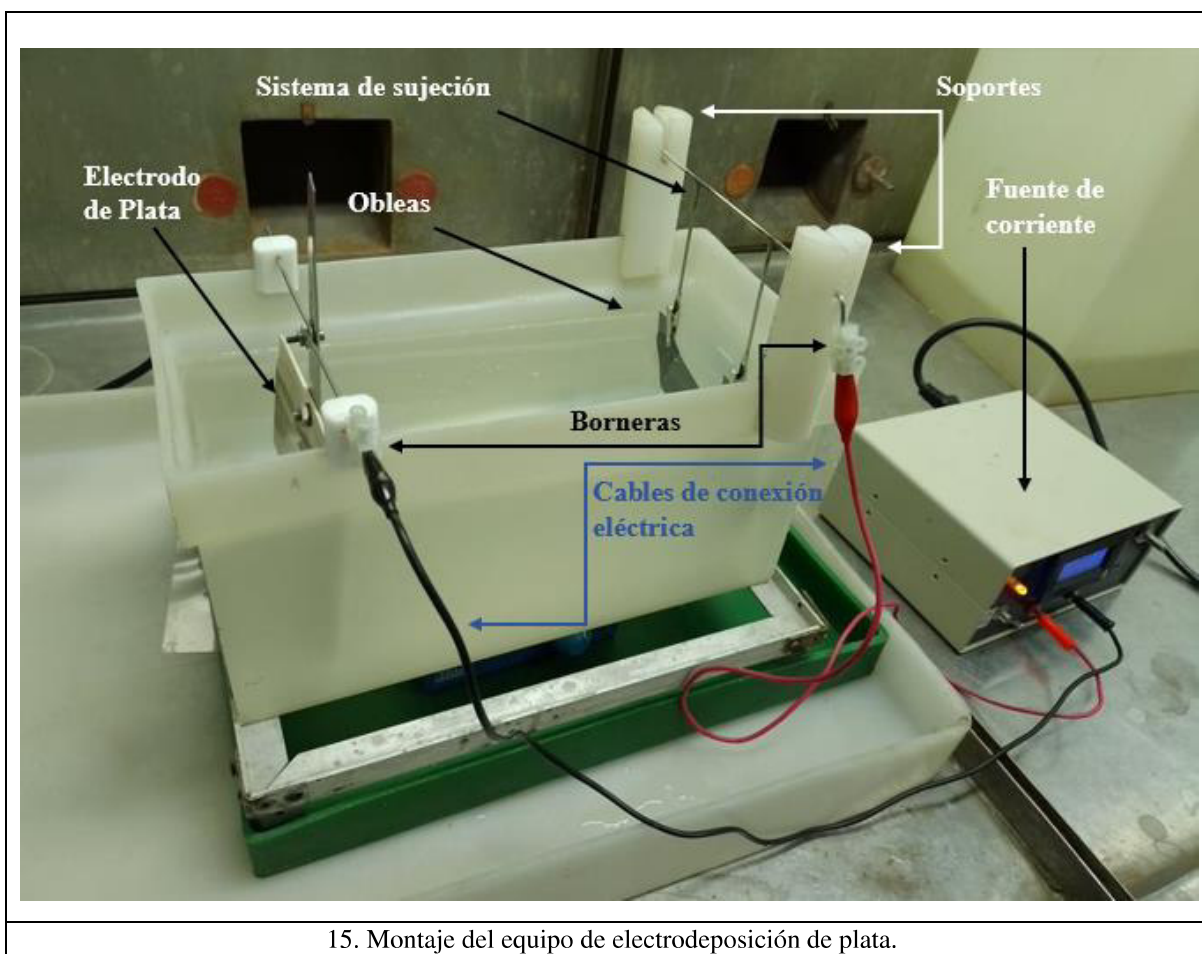
La figura 14 muestra la disposición de los soportes y el sistema de colocación fabricado con dos muestras miméticas montadas.



Con el objetivo de mejorar el sistema de conexión de las varillas con la fuente de alimentación, se propone colocar una bornera en los extremos de cada varilla, tanto del cátodo (muestras a platear) como del ánodo (electrodo de Ag).

3.4. Implementación de modificaciones

Con las mejoras incorporadas en el sistema de sujeción, los soportes y la conexión eléctrica se procedió a la fabricación de un nuevo conjunto de muestras. Se presenta el sistema montado en funcionamiento (Figura 15). Se puede observar el equipo completo de electrodeposición en marcha con la batea, el sistema de sujeción de obleas, los soportes, el electrodo de plata, el equipo de inducción magnético por debajo de la batea y el agitador dentro de ésta. Además de la fuente de corriente y los cables de contacto insertados a cada bornera (que dispone de un acoplamiento mecánico roscado) para acoplar al sistema de fijación y al electrodo de plata respectivamente.



15. Montaje del equipo de electrodeposición de plata.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Anteri, G. (2020). Apunte de ACEROS INOXIDABLES, Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales. Instituto Sábato -UNSAM.
- [2] Pastor, A. (2019) Apunte de Soldadura, Procesos de soldadura Con electrodo de Tungsteno (GTAW), Especialización de Ensayos No Destructivos. Instituto Sábato -UNSAM.
- [3] Rodríguez, P. (2001). Manual de Soldadura, Soldadura Eléctrica, MIG y TIG. Página 39.
- [4] Muncaster, P. (1991). A Practical Guide to TIG (GTA). Página 14.
- [5] Soldadura de tungsteno,
http://www.sapiensman.com/tecnoficio/soldadura/soldadura_TIG.php
- [6] Lofting, R. (2014). Brazing and Soldering. Crowood Metalworking Guides. Página 18.
- [7] Molera, Pere. (1992). Soldadura Industrial Clases y Aplicaciones. Páginas 70-71.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1. Caracterización óptica y estructural

La caracterización superficial de los sensores se realizó usando un equipo microscopia de barrido electrónico (SEM) con sistema EDS, mencionado en el Capítulo 2.

De este conjunto de descarte, se tomaron muestras para realizar el análisis empleando la técnica de microscopía electrónica de barrido.

Se aplicó la técnica mencionada para determinar la composición química de la muestra y determinar si presentaban contaminantes. En la figura 1, puede observarse el portaobjetos del microscopio con algunas de las muestras para la caracterización.



En las siguientes imágenes se muestran las micrografías con distinta magnificación y ubicación dentro del área de la muestra de sensor fotovoltaico que presento falta de adherencia del recubrimiento de plata, producido principalmente por ampollado (Figuras 2 a13).

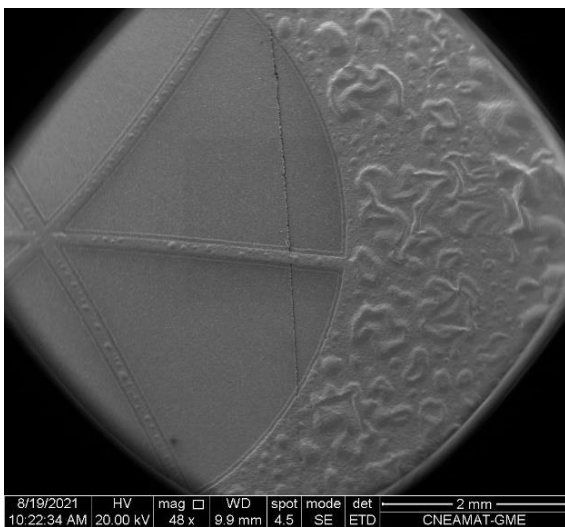


Figura 2. Micrografía 1, sensor 1 frente.

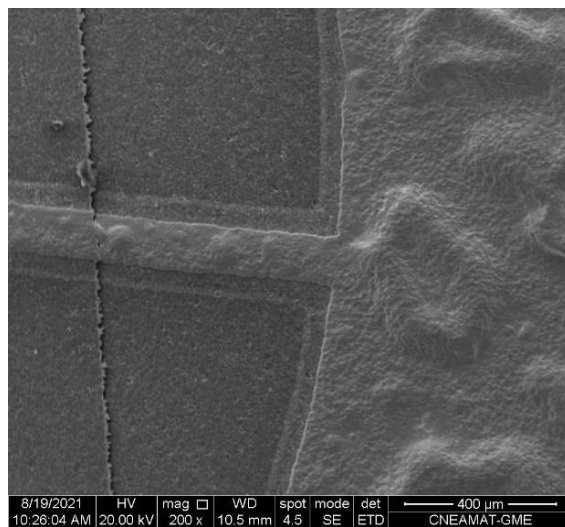


Figura 3. Micrografía 2, sensor 1 frente.

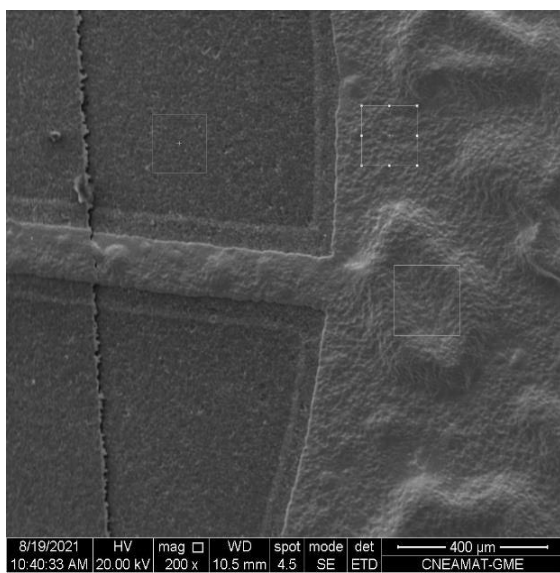


Figura 4. Micrografía 3, sensor 1 frente.

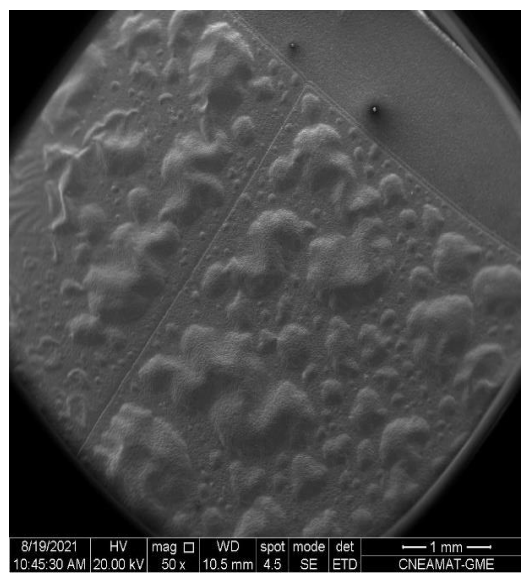


Figura 5. Micrografía 4, sensor 1 frente.

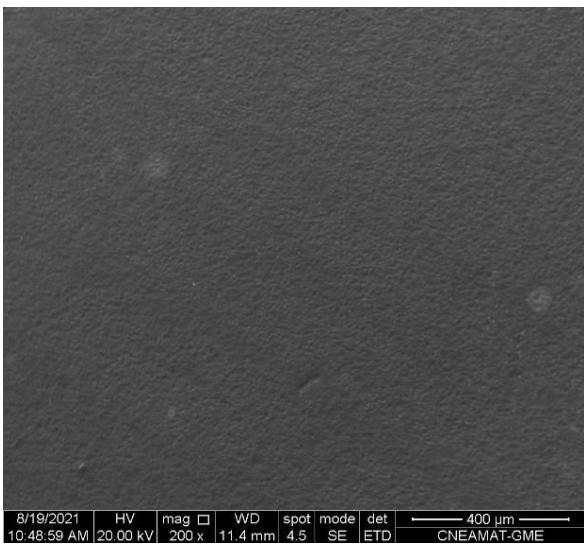


Figura 6. Micrografía 5, película

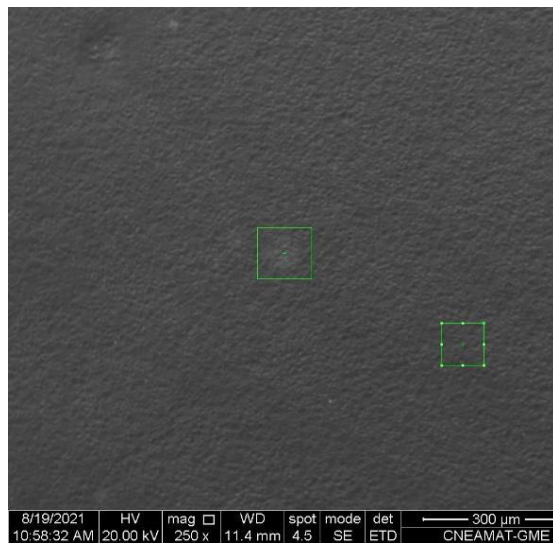


Figura 7. Micrografía 6, película 1

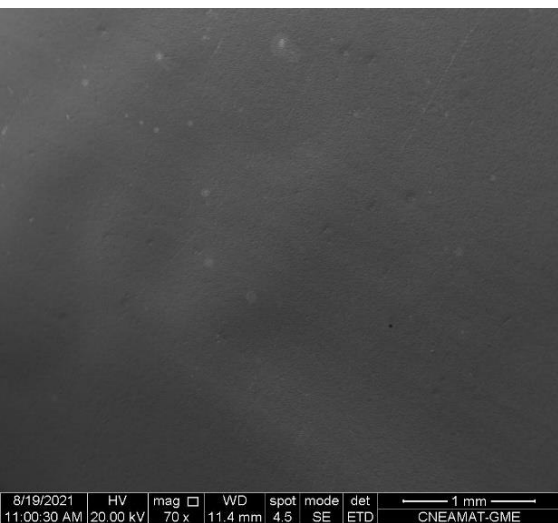


Figura 8. Micrografía 7, película 2

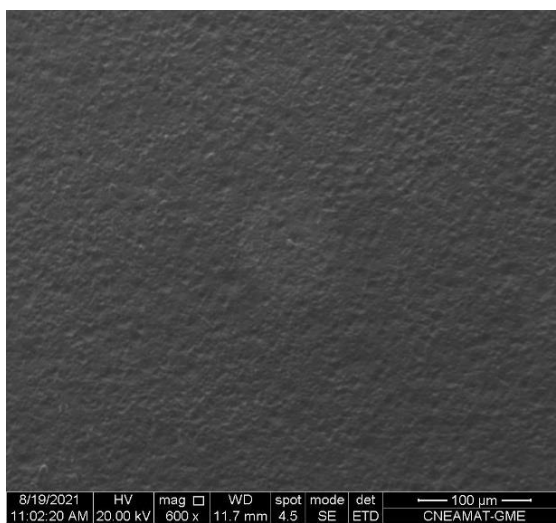


Figura 9. Micrografía 8, película 3

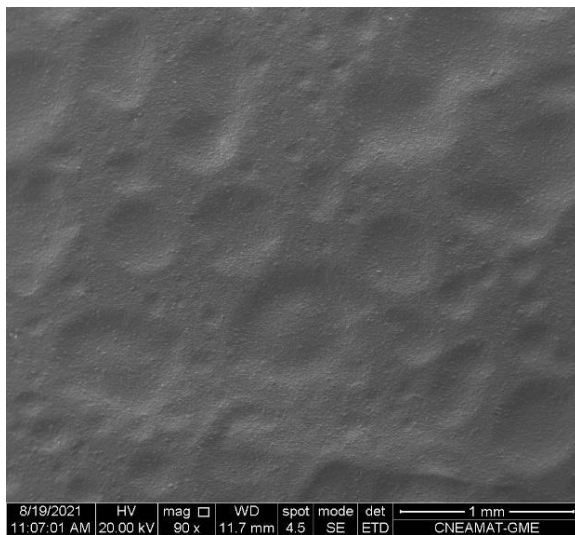


Figura 10. Micrografía 9, contacto metálico cara pegada a sensor 1

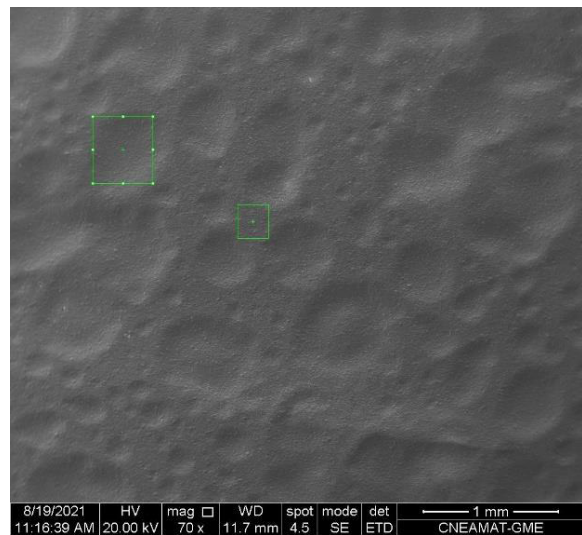


Figura 10. Micrografía 6, película cara pegada a sensor 1

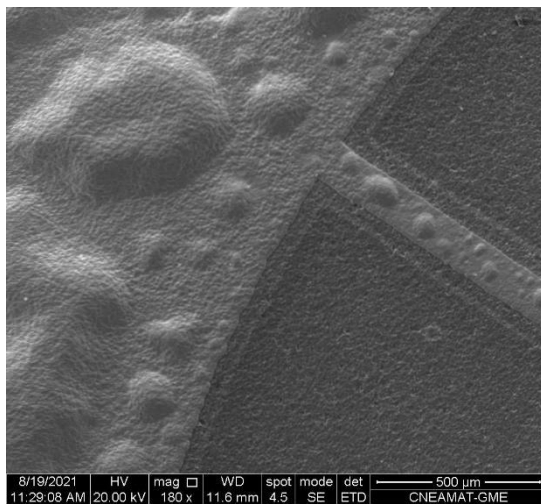


Figura 12. Micrografía 11, sensor 1 frente

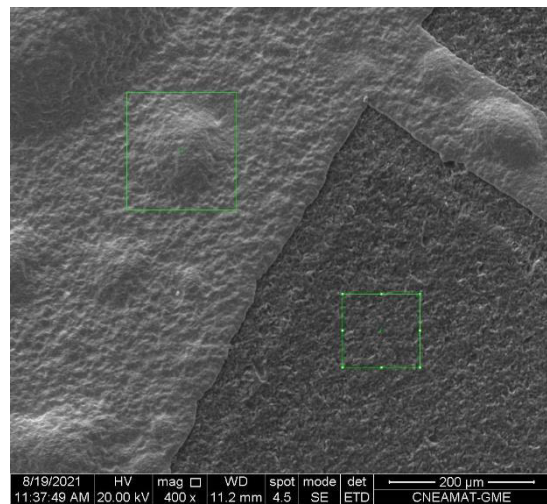


Figura 13. Micrografía 12, sensor 1 frente

En las figuras 14 a 19, se observa la espectroscopia dispersiva de rayos X (EDS), mostrando la caracterización química del sensor. Se realizaron distintos espectros en lugares puntuales de la muestra, según lo detallado en las micrografías de las figuras 4, 11 y 13.

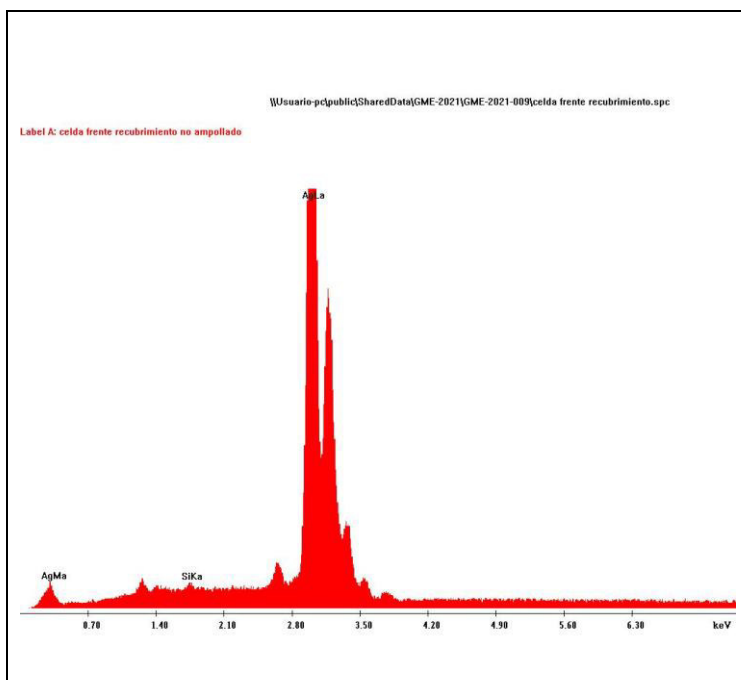


Figura 14. Espectro 1, sensor 1 frente recubrimiento relacionada a figura 4.

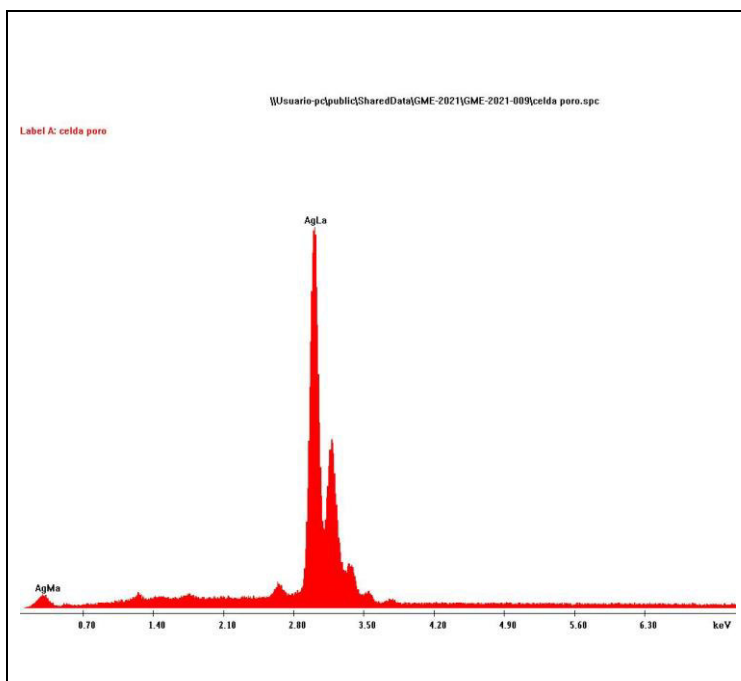
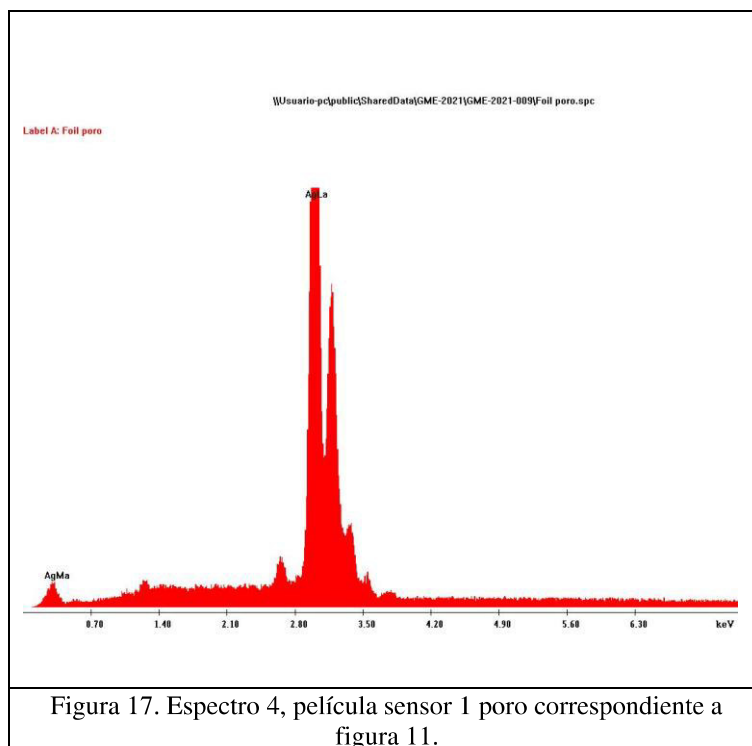
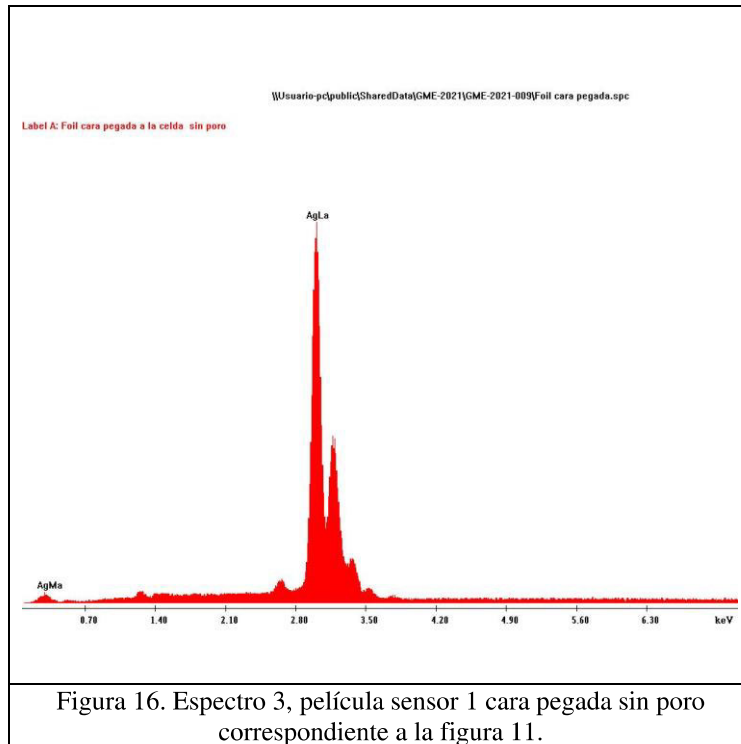
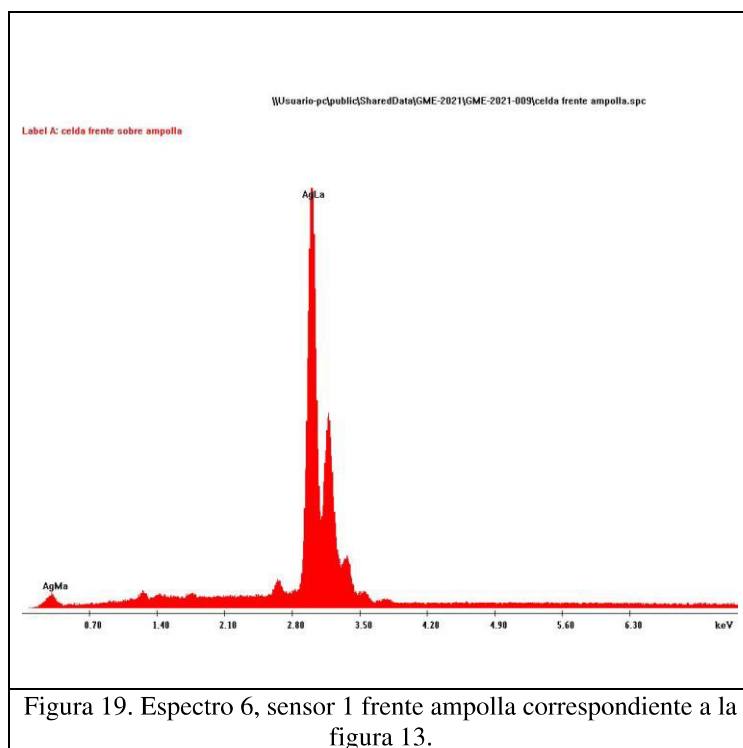
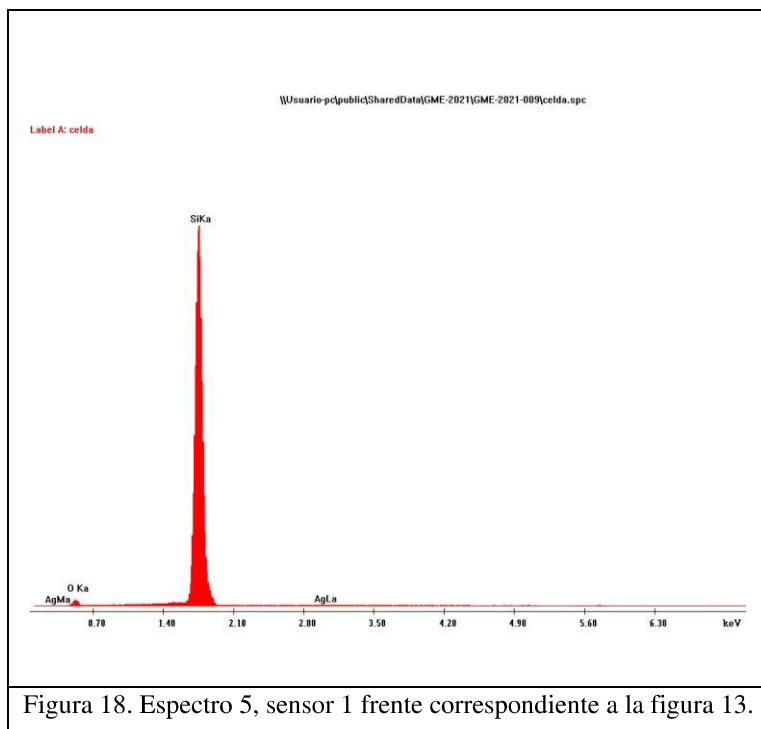


Figura 15. Espectro 2, sensor 1 frente poro correspondiente a figura 4.





A continuación, se fabricó un nuevo conjunto de sensores solares utilizando para el engrosado de contactos, el equipo de electrodeposición con las modificaciones implementadas del sistema sujeción de obleas, soportes de la sujeción y la conexión eléctrica de la fuente de corriente.

En la figura 20, se muestra un de los sensores fabricados en el proceso de difusión 2/387. Las dimensiones de los sensores son de 12 mm de lado, con un área activa de 36.4 mm². Los sensores disponen de 6 dedos metálicos colocados en forma radial.

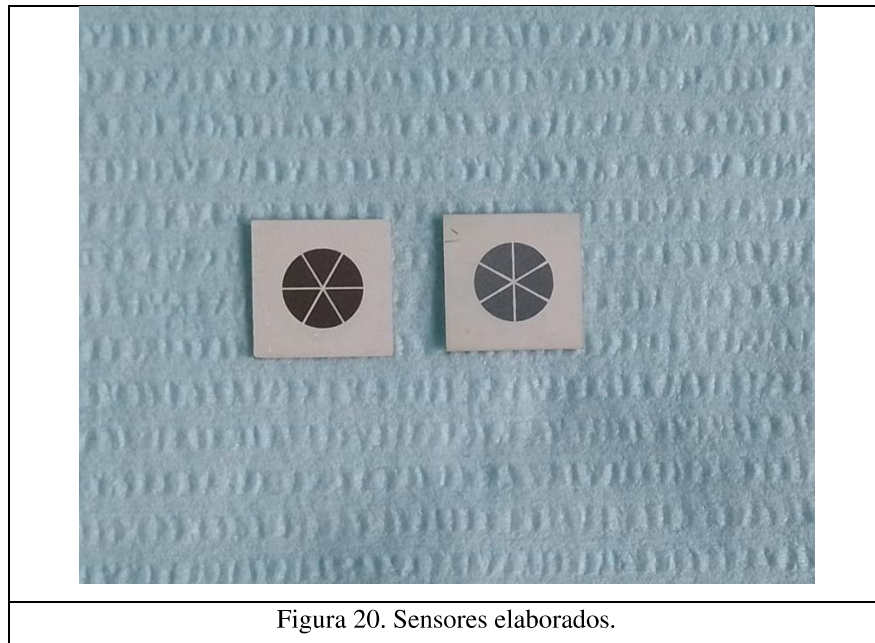


Figura 20. Sensores elaborados.

4.2. Caracterización eléctrica: curva corriente-tensión

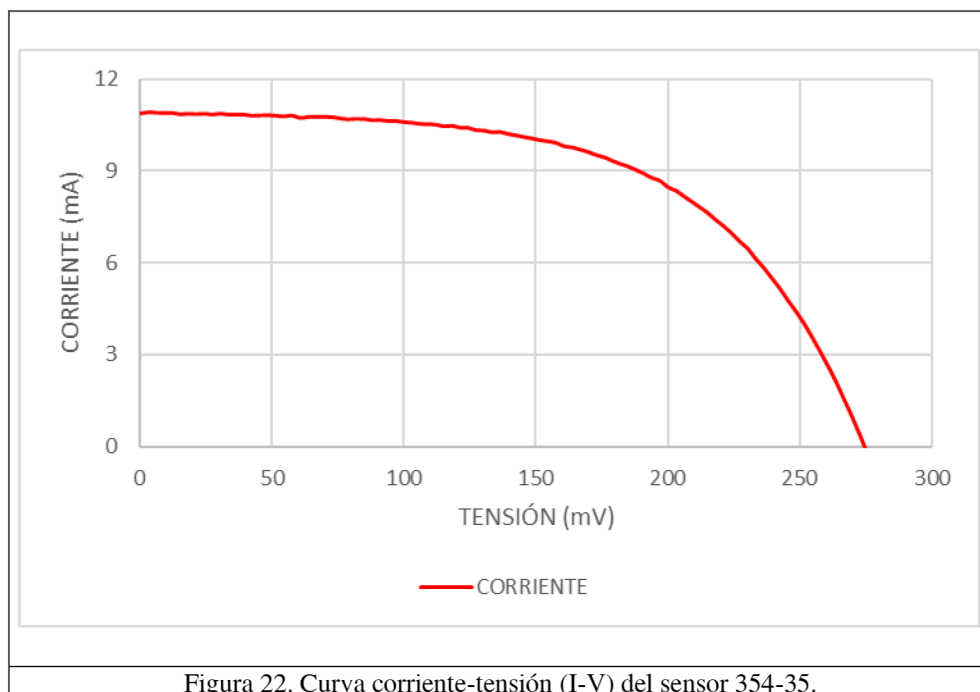
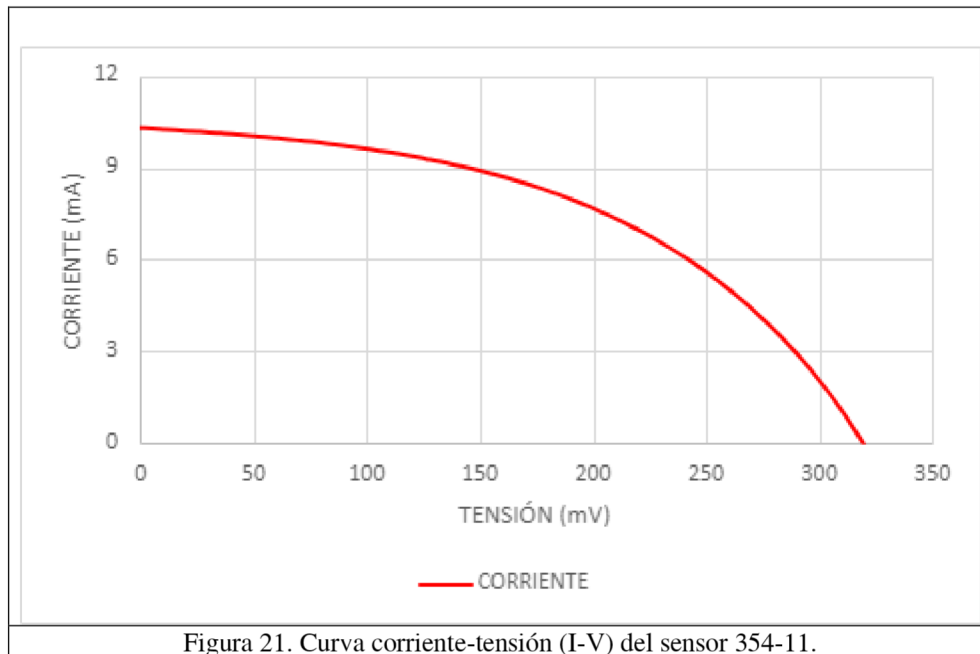
Las mediciones de las características eléctricas de los sensores solares se realizaron utilizando un simulador solar de estado estacionario presentado en el Capítulo 2 y las condiciones de medición fueron:

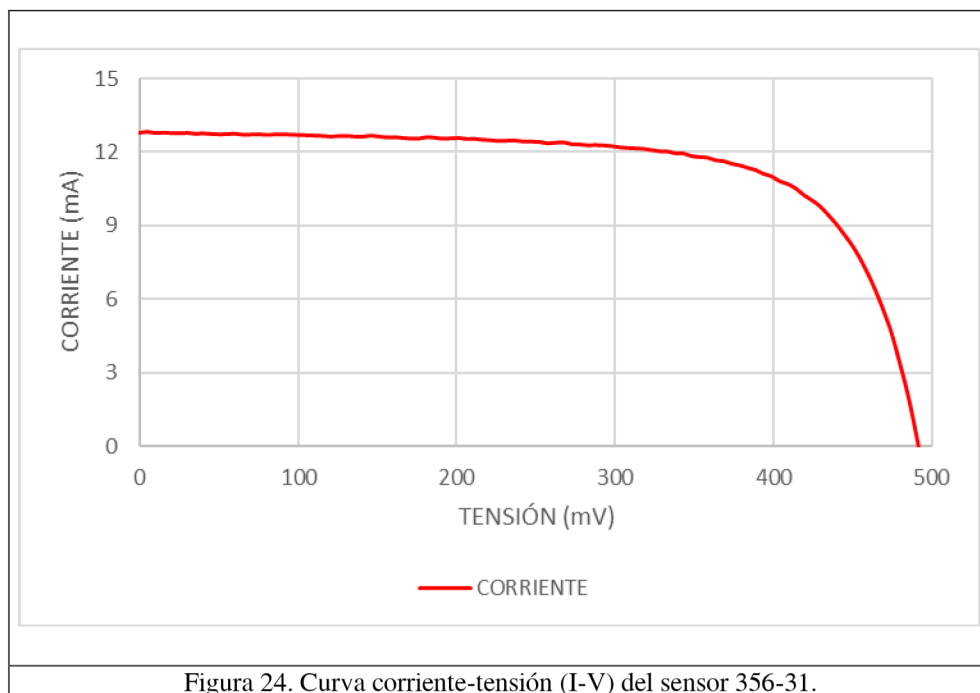
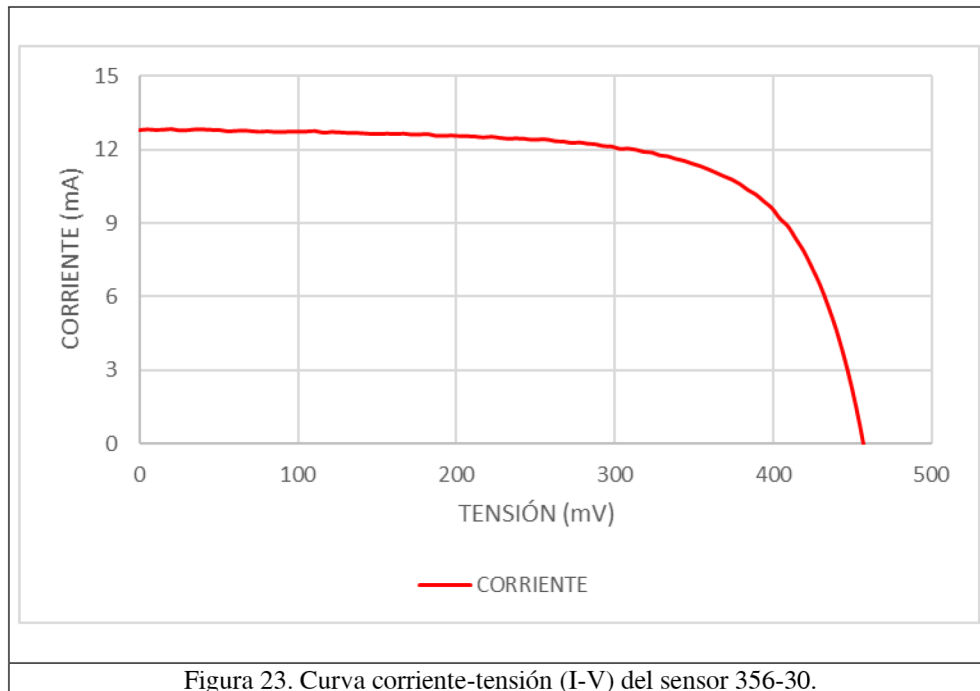
Espectro AM0

Intensidad radiación: 1367 W/m²

Temperatura controlada: 28°C

El dispositivo eléctrico tiene cuatro terminales de prueba, una carga electrónica y un sistema de adquisición de datos. En las figuras 21 a 24, se muestran las curvas corriente-tensión (I-V) de los sensores 354-11, 354-35, 356-30 y 356-31, respectivamente, fabricados en la difusión 2/387 (proceso de difusión estándar).





En la tabla 1 se tienen los valores de la corriente de cortocircuito, la tensión del circuito abierto y el factor de forma de los sensores fabricados. El valor estimado de error para I_{cc} , V_{ca} y FF, es del 3%.

Tabla 1. Parámetros eléctricos obtenidos de la medición de la curva corriente-tensión.

Sensor	I_{cc} (mA)	V_{ca} (mV)	FF
354-11	$10,30 \pm 0,3$	$318,20 \pm 9$	$0,48 \pm 0,02$
354-35	$10,90 \pm 0,3$	$272,70 \pm 8$	$0,58 \pm 0,02$
356-30	$13,04 \pm 0,4$	$484,80 \pm 14$	$0,69 \pm 0,02$
356-31	$12,80 \pm 0,4$	$489,80 \pm 14$	$0,70 \pm 0,02$

4.3. Caracterización electrónica: curva de respuesta espectral

Para la medición de la respuesta espectral de los sensores elaborados, se emplea un sensor de referencia. La adquisición de datos se realizó con un programa desarrollado por personal del DES, empleando una computadora conectada a un *lock-in*. El sensor referencia es puesto en la base termostatzada, se corre el programa que resulta a la medición de la señal generada por el sensor debido al haz monocromático para el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 340 nm y 1100 nm, conservando el sensor en condiciones de cortocircuito.

Luego se montaron los sensores elaborados siguiendo el mismo procedimiento para realizar las mediciones. Las mediciones de las características electrónicas de los sensores solares se realizaron empleando un equipo experimental presentado en el Capítulo 2. En las figuras 25 a 28, se presentan las curvas de respuesta espectral de los sensores elaborados (Difusión 2/387).

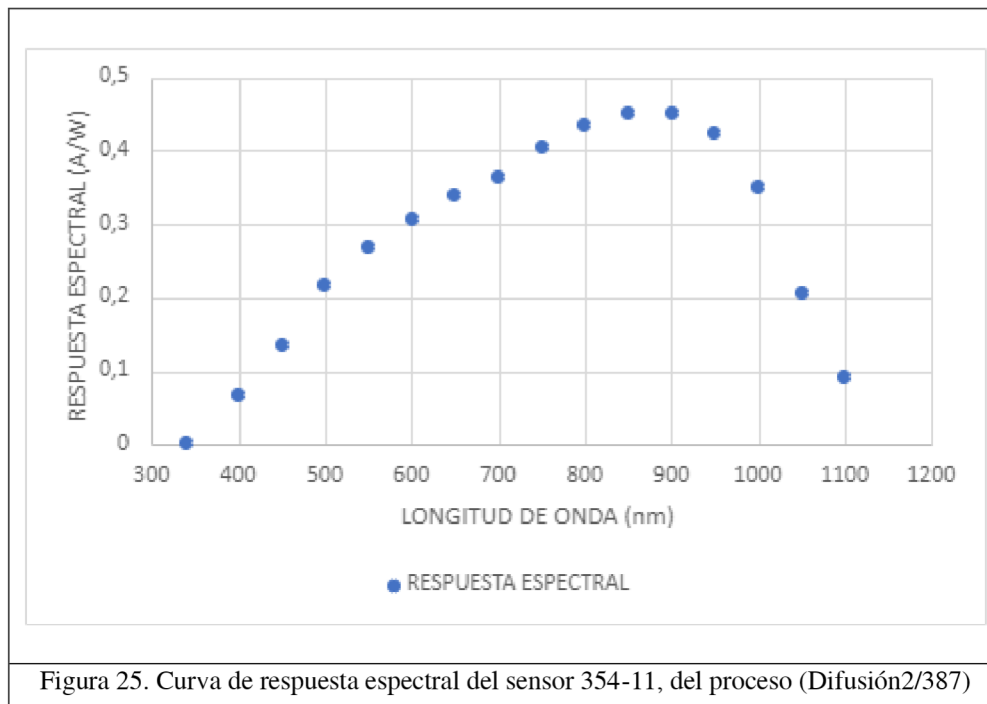


Figura 25. Curva de respuesta espectral del sensor 354-11, del proceso (Difusión2/387)

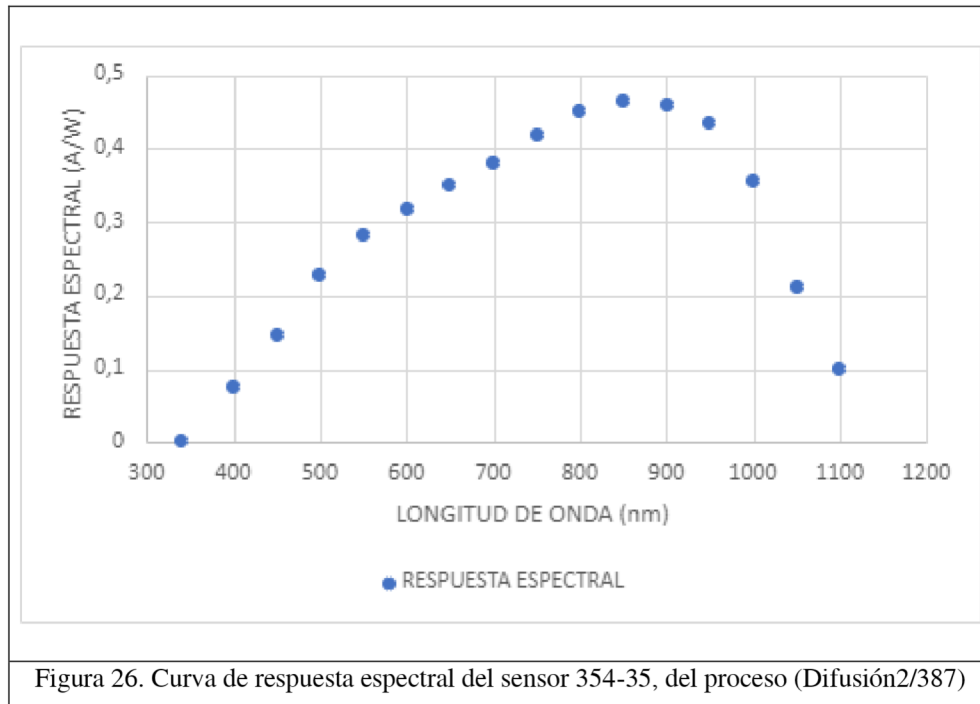


Figura 26. Curva de respuesta espectral del sensor 354-35, del proceso (Difusión2/387)

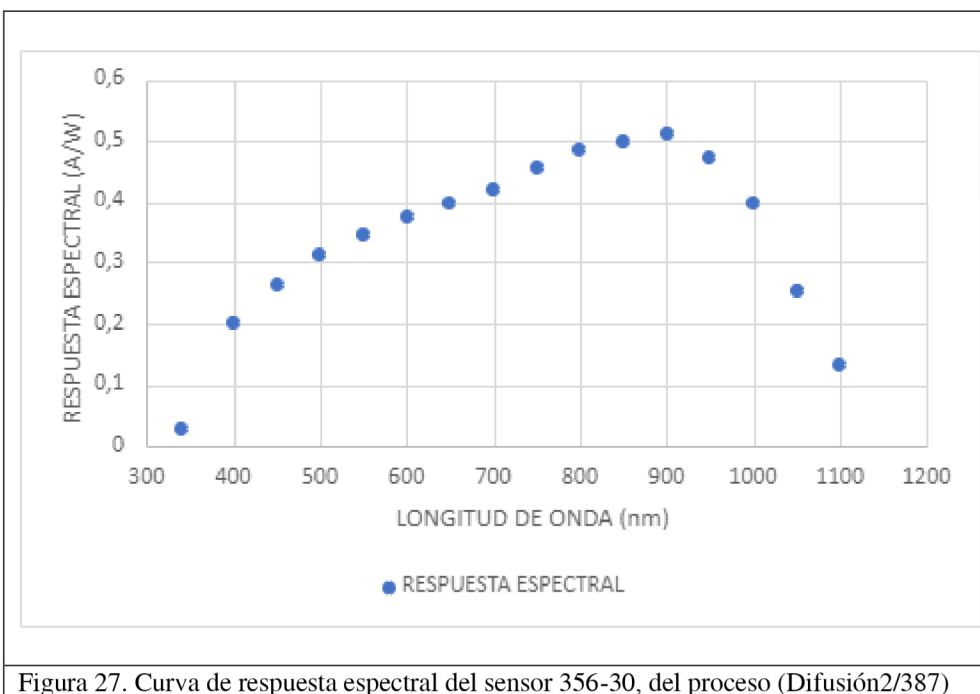


Figura 27. Curva de respuesta espectral del sensor 356-30, del proceso (Difusión2/387)

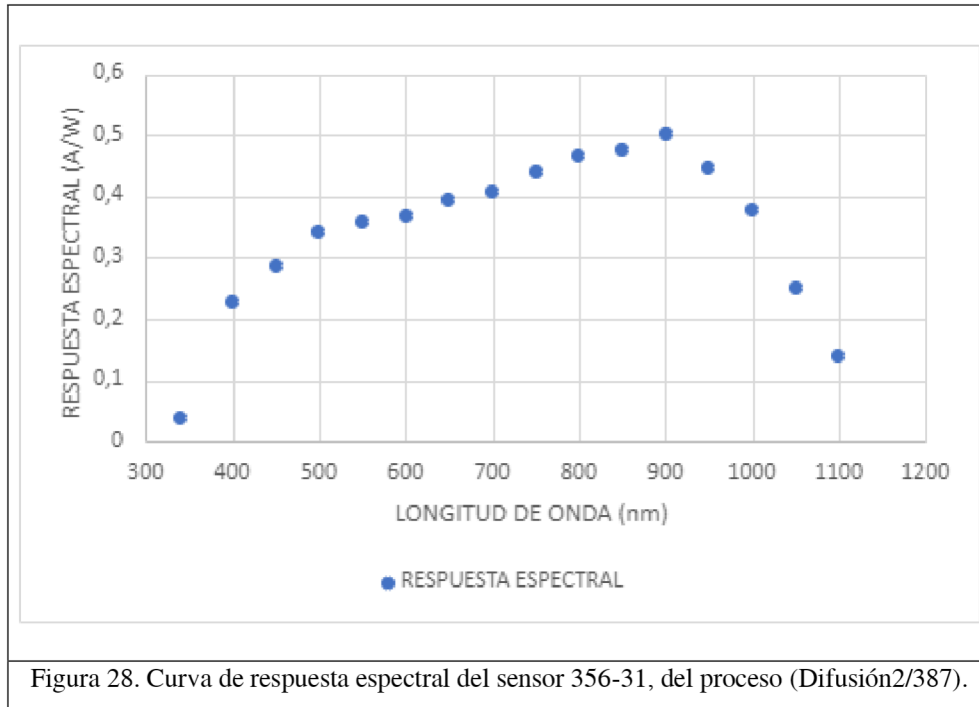


Figura 28. Curva de respuesta espectral del sensor 356-31, del proceso (Difusión2/387).

A partir de la curva de respuesta espectral del sensor fotovoltaico se puede obtener la corriente de cortocircuito. A partir de un espectro de iluminación $E(\lambda)$, la intensidad de la corriente fotogenerada por el sensor debe ser igual al área activa del sensor (A) por la integral de $RE(\lambda)$ del sensor a ensayar multiplicado por la distribución espectral, según la ecuación siguiente:

$$I_{CC} = A * J_{CC} = A \int RE(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

La integral se desarrolla entre los límites en los cuales las cantidades $E(\lambda)$ y $RE(\lambda)$ sean valores válidos. Se realizó el cálculo para la curva de RE de los sensores con la difusión 2/387, se usó el espectro de iluminación AM0.

En la tabla 2, se presentan los valores de la corriente de cortocircuito obtenidos utilizando la ecuación 1. Los valores alcanzados de I_{cc} mediante la curva de respuesta espectral se muestran en comparación los valores de I_{cc} de la curva corriente-tensión. El valor estimado de error para el cálculo de la I_{cc} por la curva de RE es del 7%.

Tabla 2. Resultados obtenidos de las mediciones eléctricas por la curva corriente-tensión y curva de respuesta espectral.

Sensor	I _{cc} (mA) - curva I-V	I _{cc} (mA) - curva RE
354-11	10,3 ± 0,3	10,1 ± 0,7
354-35	10,9 ± 0,3	10,5 ± 0,7
356-30	13,0 ± 0,4	12,6 ± 0,9
356-31	12,8 ± 0,4	12,7 ± 0,9

4.4. Conclusiones

Resumiendo, con el análisis de las micrografías y los espectrogramas correspondientes se observó la estructura (morfología) superficial identificando los elementos presentes de forma cualitativa con la composición química en ubicaciones puntuales de la muestra del sensor. Se verificó por microscopia electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía dispersiva de rayos X (EDS) que, en la primera tanda de sensores fabricados, no existen contaminantes que provoquen el ampollado y falta de adherencia del recubrimiento de plata.

Las modificaciones introducidas al proceso de engrosado de contactos fueron, reformas al equipo de electrodeposición de plata, en específico al sistema de sujeción de obleas con varillas de acero inoxidable, aplicando soldadura TIG para la unión soldada entre secciones de varillas, con este tipo de unión se obtuvo una unión fija y sólida, que contribuye a optimizar el proceso de fijación, asegurando su posición vertical al sumergirlas en la solución. Se fabricaron y mecanizaron nuevos soportes a base de poliamida-nylon en función del sistema de fijación implementado y del recipiente. También, se modificó la conexión eléctrica de la fuente de alimentación con el sistema de sujeción de obleas y el electrodo de plata en sus terminales. Se acoplaron dos secciones de borneras que poseen un ajuste mecánico roscado para asegurar los contactos conectados entre ellas.

Luego de la implementación de las modificaciones en el equipo de engrosado, se elaboró un nuevo grupo de sensores, de los cuales, se observó que las muestras no presentaron falta de adherencia del recubrimiento de plata ni ampollado en sus superficies frontales y posteriores.

Las curvas de corriente-tensión y de respuesta espectral obtenidas son acordes al diseño original del dispositivo. Por lo tanto, en lo que respecta a la caracterización eléctrica y electrónica de los sensores, los resultados obtenidos de las mediciones en el laboratorio son compatibles con los de otros sensores fabricados en el departamento.

La corriente de cortocircuito (I_{cc}) obtenida de la curva corriente-tensión, es una medición directa, en contra parte, la I_{cc} obtenida mediante la curva de respuesta espectral, es obtenida de forma indirecta, la cual resulta luego de realizar una operación de integración. Los probables errores en I_{cc} por la curva de RE, pueden deberse al instrumental electrónico, al área activa del sensor fotovoltaico y los componentes mecánicos del arreglo experimental.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el desarrollo del presente trabajo, se trazan como futuras líneas de investigación el estudio del fenómeno de pasivación como la formación de una película fina óxido sobre una superficie metálica en sensores fotovoltaicos y la caracterización óptica y estructural por la técnica de espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X (*X-Ray Principle of X-ray Photoemission Spectroscopy-XPS*). La finalidad es determinar si por este método se descubre la presencia de elementos contaminantes.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por estar presente cada día en mi vida y brindarme fortaleza para concluir esta meta.

A mi familia en Guatemala por siempre estar conmigo a la distancia, en especial a mi Mamá Graciela Toc por todo su cariño, apoyo incondicional y por ser el motor que impulsa mis sueños.

A mis hermanos Soledad Paola, Luis Jesús e Ixil Graciela por su cariño.

Muy especialmente a mis directoras Dra. Mónica G. Martínez Bogado y Dra. Mariana J.L. Tamasi, por su guía, paciencia y apoyo constante para la realización de este trabajo de tesis.

Al grupo del Departamento Energía Solar que me brindaron su ayuda de diferentes formas durante el desarrollo de este trabajo.

A la División de Microscopía Electrónica del Departamento del Departamento de Caracterización y Fractomecánica por su apoyo para la elaboración de este proyecto.

A los docentes del Instituto A. Sabato por los conocimientos brindados y el entusiasmo por explicar de la mejor forma los temas de clase.

A mis compañeros de la maestría por brindarme su compañerismo dentro y fuera del Instituto.

Al grupo de América Resiste por esencial amistad durante estos años.