

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

**Desarrollo de sensores solares finos para aplicaciones
satelitales^(*)**

por Ing. Martha Díaz Salazar

Directora

Dra. Mariana Tamasi

Co-Directora

Dra. Mónica Martínez Bogado

^(*) Tesis para optar por el título de *Doctor en Ciencia y Tecnología, mención Física*

República Argentina

2024

Resumen

Los sensores solares de posición se utilizan en aplicaciones espaciales como parte del sistema de determinación y control de actitud de un satélite. Este trabajo de tesis aborda el diseño, fabricación y caracterización de sensores solares finos de posición para aplicaciones espaciales, utilizando la tecnología de microfabricación disponible en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la experiencia adquirida en el Departamento Energía Solar (DES) en el desarrollo de sensores solares gruesos. Se enfoca en la necesidad de contar con dispositivos capaces de medir la posición del Sol con mayor precisión que los sensores solares gruesos previamente desarrollados en el DES de la CNEA.

El trabajo comenzó con el diseño de seis propuestas de sensores para medir la posición del Sol en uno y dos ejes. Estos diseños utilizan arreglos de fotodiodos integrados en un sustrato de silicio cristalino, junto con una ventana que limita y direcciona la luz incidente sobre el detector. Los diseños se evaluaron y compararon mediante simulaciones en términos de la linealidad de la respuesta, la sensibilidad y el campo de visión. Los resultados indicaron que los factores claves que influyen en la sensibilidad y el campo de visión del sensor son la altura de la ventana y el tamaño de la ventana o del fotodiodo, dependiendo de la configuración. Además, se concluyó que el sensor con detector de dos cuadrantes ofrece una mejor sensibilidad que la configuración de fotodiodo triangular y que para una mejor linealidad de la salida, se prefiere una ventana cuadrada. La mejor combinación de sensibilidad y simetría se obtiene con el diseño de dos cuadrantes con ventana circular. A partir de las simulaciones, se definieron los parámetros de fabricación, como la separación entre los fotodiodos, el tamaño de la ventana y el grosor del vidrio.

Durante la fabricación, se optimizaron diversas técnicas, logrando buenos resultados en la definición de las máscaras duras, con un espesor de SiO_2 de

270 nm. Se elaboraron arreglos de fotodiodos formados por junturas localizadas $n^+/p/p^+$, utilizando procesos típicos de microfabricación como crecimientos de SiO_2 , difusión de dopantes, fotolitografías con alineación y depósitos de metales. Además, se definieron los pasos para la elaboración de la ventana metalizada y se desarrolló un soporte para facilitar la caracterización eléctrica de los sensores.

Los dispositivos elaborados fueron caracterizados mediante curvas características corriente-tensión, respuesta espectral y respuesta angular. Esta última fue comparada con las simulaciones realizadas, permitiendo determinar el error de alineación en el dispositivo. La validación del modelo propuesto, a partir del contraste entre los resultados simulados y experimentales, proporciona una herramienta clave para optimizar el desarrollo de sensores.

El resultado más significativo fue que los sensores fabricados de uno y dos ejes son capaces de determinar la posición del Sol con una precisión de 1° en un campo de visión de 50° , con una respuesta angular que se ajusta adecuadamente a las simulaciones. Con este resultado se mejoró la precisión de los sensores solares elaborados en el DES.

Finalmente, se realizó un ensayo de ambiente espacial en la línea EDRA del acelerador TANDAR de la CNEA. Se evaluó el daño por radiación producido por protones en los dispositivos, simulando una misión de 5 años en una órbita baja, observándose una degradación de hasta un 20% en condiciones extremas.

Este desarrollo contribuye al Plan Espacial Nacional, incrementando la oferta de productos disponibles para la industria espacial argentina y mejorando la capacidad tecnológica del país en el campo de los sensores solares para aplicaciones espaciales. Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para el desarrollo de sensores solares nacionales, con posibles mejoras en futuras versiones.

Abstract

Sun sensors are used in space applications as part of a satellite's attitude determination and control system. This thesis addresses the design, fabrication, and characterization of fine sun sensors for space applications, utilizing the microfabrication technology available at the National Atomic Energy Commission (CNEA) and the expertise gained at the Solar Energy Department (DES) in the development of coarse sun sensors. It is based on the need for devices capable of measuring the Sun's position with higher precision than the previously developed coarse sun sensors at DES of CNEA.

This work began with the design of six proposals for single and dual axis sun position sensors. These designs are based on a photodiode array detector and a window to limit and direct the light that reaches the detector. The designs were evaluated and compared through simulations in terms of response linearity, sensitivity, and field of view.

From the simulations performed, we concluded that for each design, the key factors that influence the sensitivity and field of view performance are the window height and window or photodiode size, depending on the sensor configuration. From the comparison across architectures, the detector configuration, as well as the window geometry, influences the sensitivity and linearity of the response under similar operating conditions. The two-quadrant detector configuration offers a better sensitivity than the triangular photodiode configuration and for better linearity of the output, a square window is preferred. The results indicated that the two-quadrant design with a circular window provided the best combination of sensitivity and symmetry. Based on the simulations, the fabrication parameters were defined, such as the separation between photodiodes, window size, and glass thickness.

During the fabrication process, it was optimized the techniques to obtain the hard mask, achieving satisfactory results in the definition of hard masks, with a SiO₂ thickness of 270 nm. Arrays of photodiodes were fabricated using localized *n⁺/p/p⁺* junctions and typical microfabrication processes such as SiO₂ growth, dopant diffusion, aligned photolithography, and metal deposition. Additionally, the steps for fabricating the metalized window were established, and a support structure was developed to facilitate the electrical characterization of the sensors.

The fabricated devices were characterized through current-voltage curves, spectral responsivity, and angular response. The latter was compared with the simulations, allowing for the determination of alignment error in the device. The validation of the proposed model, through the comparison of simulated and experimental results, provides a key tool for optimizing sensor development.

The most significant result was that the fabricated one- and two-axis sensors were able to determine the Sun's position with 1° accuracy within a 50° field of view, with an angular response that closely matched the simulations. This result improved the precision of the solar sensors previously developed at DES.

Finally, a space environment test was conducted on the EDRA line of the TANDAR accelerator at CNEA. Proton radiation damage to the devices was evaluated, simulating a 5-year mission in low Earth orbit, with up to 20% degradation observed under extreme conditions.

This development contributes to the National Space Plan by increasing the range of products available to the Argentine space industry and enhancing the country's technological capacity in the field of solar sensors for space applications. The results provide a solid foundation for the development of national solar sensors, with potential improvements in future versions.

Agradecimientos

Para empezar, tengo que agradecer a mis padres, ¡lo logré! Sin ustedes nada de esto hubiese empezado.

A Oscar y Norma, que me abrieron las puertas de su casa y me dieron una familia en Argentina.

A mis directoras, Mariana y Mónica, que me dieron la oportunidad de venir a este país a trabajar en algo que me apasiona, y me apoyaron para seguir avanzando.

A Sonia, que nunca dejó de ser mi tutora, gracias por el apoyo incondicional, la paciencia, los consejos y su amistad.

A Analía y Nadia, porque no solo son excelentes profesionales y pudimos enfrentar juntas todas las adversidades, sino porque me acogieron y formamos una amistad que sobrepasa el ámbito laboral. Han sido mi sostén a lo largo de estos años.

A Lucas, por el apoyo, el ojo crítico, la paciencia y la ayuda. A su familia por acogerme.

A todo el grupo de ingeniería: Seba, Claudio, Josecito, Marce, José. ¡Gracias! Este trabajo no fuera posible sin el apoyo que me dieron cada uno de ustedes.

A Andrés Di Donato, quien podría ser mi otro co-director, gracias por el apoyo, los consejos, por escucharme y ayudarme a descifrar que podía estar pasando cada vez que me tropecé con una pared. Hago extensivo el agradecimiento a todo el grupo del DMNT de CNEA, Claudio, Dante, Diego, por la buena disposición para el trabajo.

A Martín Alurralde, gracias por la paciencia, y a Juan Pla, por siempre estar dispuestos a ayudarme.

A todas las personas que hicieron que el trabajo fuera más llevadero, Simón, Walter, Nata, Vicky, Guille, Fede, Pedro, y a todos los grupos del café.

A todas las instituciones que financiaron este trabajo: CONICET, UNSAM, CNEA.

Índice general

Resumen	3
Abstract	5
Agradecimientos	7
Índice general	8
Índice de Figuras	12
Índice de Tablas	21
Capítulo 1 Sensores solares de posición	23
1.1. Clasificaciones y principios de operación	25
1.2. Desarrollo de sensores solares para aplicaciones espaciales en Argentina	30
1.2.1. Antecedentes.....	30
1.2.2. Motivación y objetivos.....	33
1.3. Propiedades físicas de los materiales y dispositivos fotovoltaicos	34
1.3.1. Características de la juntura $p-n$	38
1.3.2. Curva corriente - tensión y circuito equivalente.....	42
1.3.3. Respuesta espectral	43
Referencias	45
Capítulo 2 Diseño y simulación de sensores solares finos	51
2.1. Diseño general de los sensores finos	51
2.2. Sensores solares finos de un eje.....	56
2.2.1. Diseño del sensor con detector de dos cuadrantes.....	57
2.2.2. Simulación del sensor con detector de dos cuadrantes	60
2.2.3. Diseño del sensor con fotodiodos triangular y rectangular	65

2.2.4.	Simulación del sensor con fotodiodos triangular y rectangular	67
2.2.5.	Comparación entre los sensores de un eje	69
2.3.	Sensores solares finos de dos ejes	71
2.3.1.	Diseño del sensor con detector de cuatro cuadrantes	72
2.3.2.	Simulación del sensor con detector de cuatro cuadrantes	74
2.3.3.	Diseño del sensor basado en fotodiodo triangular	76
2.3.4.	Simulación del sensor basado en fotodiodo triangular	78
2.4.	Conclusiones.....	79
	Referencias.....	82
Capítulo 3	Fabricación de sensores solares finos	83
3.1.	Fabricación del detector	83
3.1.1.	Preparación de las muestras	84
3.1.2.	Elaboración de la juntura	85
3.1.2.1.	Crecimiento del SiO ₂ de la máscara dura.....	86
3.1.2.2.	Fotolitografía de la máscara dura.....	88
3.1.2.3.	Ataque químico del SiO ₂ de la máscara dura.....	90
3.1.2.4.	Evaporación de aluminio.....	95
3.1.2.5.	Difusión de dopantes: Formación de la juntura n+/p/p+	96
3.1.2.6.	Medición de resistencia de capa.....	98
3.1.3.	Elaboración de los contactos metálicos	99
3.1.4.	Corte de la oblea de silicio.....	101
3.2.	Elaboración de la ventana	102
3.3.	Integración del sensor	105
3.4.	Conclusiones.....	106
	Referencias.....	107
Capítulo 4	Caracterización eléctrica: Curvas Características Corriente - Tensión y Respuesta Espectral.....	109
4.1.	Curva característica corriente – tensión (I-V).....	110
4.1.1.	Arreglo experimental.....	110

4.1.1.1.	Procedimiento de medición de la curva I-V	111
4.1.1.2.	Modelo circuital del arreglo de dos fotodiodos	112
4.1.2.	Curva I-V del detector sin vidrio	112
4.1.2.1.	Detectores de dos cuadrantes	113
4.1.2.2.	Detectores de cuatro cuadrantes	117
4.1.2.3.	Detector con fotodiodo triangular y fotodiodo rectangular	120
4.1.3.	Curva I-V del detector con vidrio	123
4.1.4.	Curva I-V del sensor integrado: detector con ventana	124
4.2.	Respuesta espectral.....	126
4.2.1.	Arreglo experimental.....	127
4.2.2.	Respuesta espectral: Resultados	128
4.3.	Conclusiones.....	128
	Referencias.....	129
Capítulo 5	Caracterización de la respuesta angular.....	131
5.1.	Arreglo experimental y procedimiento de medición	132
5.2.	Caracterización de la respuesta angular del detector con vidrio	135
5.3.	Caracterización de la respuesta angular de los sensores integrados	139
5.3.1.	Determinación de la incidencia normal de la luz en el sensor	139
5.3.2.	Respuesta angular de los sensores	142
5.4.	Comparación de la respuesta angular medida con la simulada	145
5.4.1.	Determinación de la J_{CC} y el error de alineación entre la ventana y el detector	145
5.4.1.1.	Cálculo del error de alineación entre la ventana cuadrada y el detector de dos cuadrantes.....	147
5.4.1.2.	Cálculo del error de alineación entre la ventana cuadrada y el detector de cuatro cuadrantes.....	148
5.4.1.3.	Cálculo del error de alineación de la ventana circular con el detector de dos cuadrantes.....	149
5.4.1.4.	Cálculo del error de alineación de la ventana circular con el detector de cuatro cuadrantes.....	150

5.4.2.	Comparación del sensor de un eje con la simulación	151
5.4.3.	Comparación del sensor de dos ejes con la simulación	154
5.5.	Conclusiones.....	157
	Referencias.....	158
Capítulo 6	Ensayo de ambiente espacial: estudio del daño por radiación	159
6.1.	Diseño de los experimentos	161
6.2.	Irradiación de los dispositivos.....	164
6.3.	Caracterización de la degradación de los dispositivos irradiados	167
6.3.1.	Caracterización mediante curvas I-V	168
6.3.2.	Caracterización de la respuesta espectral	170
6.4.	Conclusiones.....	173
	Referencias.....	174
	Conclusiones generales.....	175
Anexo A	Estado de la técnica de sensores solares.....	179
	Referencias.....	189
Anexo B	Máscaras de fotolitografía	193

Índice de Figuras

Figura 1.1. Representación esquemática de un sensor solar grueso.	26
Figura 1.2. (a) Sensor solar con máscara de un eje. (b) Sensor solar de dos ejes con máscara, la luz del Sol es normal a la ventana si las salidas de las cuatro celdas solares son iguales.	28
Figura 1.3. Sección transversal y principio de funcionamiento de un PSD [26].	28
Figura 1.4. Detalles del componente de medición de un sensor solar digital [6].....	29
Figura 1.5. Panel y sensores gruesos de ingeniería del satélite SAC-A.....	31
Figura 1.6. Sensor de posición integrado al panel de vuelo del satélite SAC-D.	32
Figura 1.7. Sensores solares gruesos montados en el panel solar del satélite SAOCOM 1A.	32
Figura 1.8. Metodología de trabajo para obtener el dispositivo final.....	33
Figura 1.9. (a) Semiconductor intrínseco, E_F cerca de la mitad de la banda prohibida, (b) semiconductor dopado tipo n, (c) semiconductor dopado tipo p. De izquierda a derecha: diagrama de bandas, densidad de estados, distribución de Fermi y concentración de portadores. [48, 49].....	35
Figura 1.10. (a) Representación esquemática de semiconductores tipo n y tipo p aislados y su correspondiente diagrama de bandas. (b) Juntura p-n.	38
Figura 1.11. Juntura p-n en condiciones de equilibrio térmico. Izquierda: distribución de la carga espacial en la región de vaciamiento, distribución del campo eléctrico y potencial de contacto. Derecha: diagrama de bandas.....	40
Figura 1.12. Juntura p-n. (a) Polarización directa. (b) Polarización inversa.....	40
Figura 1.13. Curva característica J-V de la juntura p-n en condiciones de oscuridad e iluminación.....	42
Figura 1.14. (a) Modelo circuital ideal de un fotodiodo, conectado a una carga R_L , [50]. (b) Curva característica corriente - tensión (I-V) en el primer cuadrante.	43
Figura 1.15. Respuesta espectral en función de la longitud de onda para un fotodiodo con $\eta = 1$ y para un fotodiodo típico comercial de silicio. [48]	44
Figura 1.16. Irradiancia espectral solar extraterrestre, en condiciones AM0 [53], resaltado en amarillo el rango típico de respuesta del Si.	45

Figura 2.1. Sección transversal de un detector formado por un arreglo de dos fotodiodos.	52
Figura 2.2. Representación del movimiento del Sol en el sistema de referencia del sensor.	53
Figura 2.3. Configuración general de un sensor solar de posición y parametrización de la posición del Sol en el plano del detector.	53
Figura 2.4: Corrección de la posición del centro del haz de luz al considerar el error de alineación entre la ventana y el detector.	54
Figura 2.5. Diagrama de flujo del programa desarrollado para simular la respuesta de los diferentes diseños.	55
Figura 2.6. Vista en perspectiva y superior del sensor de un eje diseñado con un detector de dos cuadrantes, con una ventana cuadrada (a) y (c), y con ventana circular (b) y (d).	57
Figura 2.7. Simulaciones variando la altura de la ventana, h , con $r = 1$ mm en $\varphi = 0^\circ$, con ventana cuadrada (izquierda) y ventana circular (derecha). (a) Área iluminada en cada fotodiodo. (b) Función de transferencia $H_{2C}(\vartheta, \varphi = 0^\circ)$	61
Figura 2.8. Simulaciones del sensor de un eje con detector de dos cuadrantes, variando el ancho de la ventana, $2r$, con ventanas cuadrada (izquierda) y circular (derecha) de 1 mm de espesor. (a) Área iluminada en cada fotodiodo. (b) Función de transferencia $H_{2C}(\vartheta, \varphi = 0^\circ)$	62
Figura 2.9. Simulación de la I_{CC} para diferentes tamaños (a), alturas (b) y geometrías de la ventana: cuadrada (izquierda) y circular (derecha).	64
Figura 2.10. Simulaciones del sensor de un eje con detector de dos cuadrantes y ventana cuadrada de 2 mm de ancho y 1 mm de espesor. (a) Área iluminada en cada fotodiodo y (b) función de transferencia $H_{2C}(\vartheta, \varphi)$	65
Figura 2.11. (a) Diseño del sensor de posición de un eje con fotodiodos triangular y rectangular, (b) Vista superior del detector iluminado para analizar el área iluminada en cada fotodiodo.	66
Figura 2.12. Simulaciones del sensor de un eje con fotodiodo triangular para diferentes alturas del triángulo, con $a = 6$ mm, $h = 1$ mm y $2r = 2$ mm. Área iluminada (izquierda) e I_{CC} del fotodiodo triangular (centro), y la función de transferencia del sensor (derecha). Las regresiones lineales están indicadas con líneas grises discontinuas.	68
Figura 2.13. Simulaciones del sensor de un eje con fotodiodo triangular para diferentes alturas de la ventana, con $a = b = 6$ mm, $c = 3$ mm y $2r = 2$ mm. Área iluminada (izquierda) e I_{CC} (centro) del fotodiodo triangular, y la función de transferencia del sensor (derecha).	68

Figura 2.14. Simulaciones del sensor de un eje con fotodiodo triangular para diferentes tamaños de la ventana, con $a = b = 6 \text{ mm}$ y $h = 1 \text{ mm}$. Área iluminada (izquierda) e I_{CC} del fotodiodo triangular (centro), y la función de transferencia del sensor (derecha)...	69
Figura 2.15. Comparación de los tres diseños propuestos con un vidrio de 1 mm de espesor. (a) Área iluminada, (b) I_{CC} simulada del fotodiodo A de cada diseño, (c) función de transferencia simulada de los tres diseños propuestos.	70
Figura 2.16. Diseño del sensor solar de posición de dos ejes con detector de cuatro cuadrantes y la vista superior del detector para analizar el área iluminada en función de la geometría de la ventana: (a) y (b) cuadrada, (c) y (d) circular.	72
Figura 2.17. Simulación del área iluminada de cada fotodiodo en función de la posición del Sol al utilizar una ventana circular.	75
Figura 2.18. Simulación de la I_{CC} de cada fotodiodo del sensor con detector de cuatro cuadrantes y ventana circular, en función de la posición del Sol.	76
Figura 2.19. Simulación de la función de transferencia de cada eje (H_X^{4C} , H_Y^{4C}) del sensor de dos ejes con detector de cuatro cuadrantes y ventana circular.	76
Figura 2.20. (a) Diseño del sensor de dos ejes con un fotodiodo triangular y una ventana rectangular. (b) Vista superior del detector para analizar el área iluminada en cada fotodiodo.	77
Figura 2.21. Simulación de la función de transferencia (H_X , H_Y) del sensor de dos ejes con fotodiodo triangular.	78
Figura 2.22. Comparación de la función de transferencia simulada (H_X , H_Y) del sensor de dos ejes con fotodiodo triangular.	79
Figura 2.23. Comparación de la I_{CC} simulada de los fotodiodos triangular (A) y rectangular (C) con $a = b = d = 2 \text{ mm}$ y $2r = 0,5 \text{ mm}$	79
Figura 3.1. Pasos para elaboración del detector.	83
Figura 3.2. Secuencia de pasos de limpieza.	85
Figura 3.3. Pasos para la elaboración de las juntas localizadas.	85
Figura 3.4. Espesor de máscara de SiO_2 necesario para evitar difusión de fósforo en función del tiempo y la temperatura. [4]	86
Figura 3.5. (a) Horno de alta temperatura THERMCO. (b) Esquema del horno.	87
Figura 3.6. Tasa de crecimiento de SiO_2 en oxidación seca para obleas de Si con orientación (100), se destacan los puntos de la curva para 270 y $400 \mu\text{m}$. [4]	88
Figura 3.7. Proceso de fotolitografía.	89
Figura 3.8. Fotolitografía para el ataque químico húmedo.	90
Figura 3.9. Marca de alineación definida con fotolitografía de dos pasos sobre SiO_2	90
Figura 3.10. Pasos para transferir el patrón de la fotolitografía al SiO_2 mediante ataque químico húmedo.	91

Figura 3.11. Transferencia del patrón definido con fotolitografía al SiO ₂ mediante ataque químico húmedo, (a) y (b) antes de remover la fotorresina, (c) luego de remover la fotorresina.....	91
Figura 3.12. Ataque químico húmedo a SiO ₂ de 270 nm, cara frontal y cara posterior.	92
Figura 3.13. Proceso RIE, reacciones químicas y acciones físicas.	92
Figura 3.14. Configuración típica de RIE.....	93
Figura 3.15. RIE Plasmalab 80 Plus de Oxford Instruments, Sala Limpia del DMNT... ..	93
Figura 3.16. Pasos para remover el SiO ₂ de la oblea mediante RIE.	94
Figura 3.17. Cara posterior de una muestra con el depósito de fluorocarbono que frenó el ataque al SiO ₂	94
Figura 3.18. Oblea con estructuras de prueba antes y después del ataque en el RIE.	95
Figura 3.19. Evaporadora marca Leybold-Heraeus modelo Univex 300.	95
Figura 3.20. Cara posterior con Al evaporado antes de la difusión.....	95
Figura 3.21. Sistema de difusión de P mediante fuente líquida de POCl ₃	97
Figura 3.22. Cara posterior después de la difusión.	98
Figura 3.23. Equipamiento para la medición de resistencia de capa.....	98
Figura 3.24. Pasos para obtener el patrón de contactos deseado.....	99
Figura 3.25. (a) Alineadora de máscaras EVG-620, (b) alineación de la máscara con el sustrato, (c) inspección de la fotolitografía de contactos y las marcas de alineación con el SiO ₂ en el microscopio óptico.	100
Figura 3.26. Fotolitografía de contactos con alineación.	100
Figura 3.27. Ambas caras de una oblea, (a) y (b) después de la evaporación de contactos y (c) y (d) después del lift-off.....	101
Figura 3.28. Contactos de cada fotodiodo y barrera de SiO ₂ de un detector.	101
Figura 3.29. Sierra de corte con alineación óptica.	102
Figura 3.30. Detectores elaborados con diferentes diseños y áreas activas.	102
Figura 3.31. Pasos de la elaboración de la ventana.....	103
Figura 3.32. Sierra de corte con modificaciones (izquierda) y durante el corte del vidrio (derecha).	103
Figura 3.33. a) Alineación de la fotolitografía con el marcado del vidrio.	104
Figura 3.34. Ventanas metalizadas después del <i>lift-off</i>	105
Figura 3.35. Diseño del soporte del sensor para caracterización: (a) base y (b) tapa.	106
Figura 3.36. Integración en el soporte de caracterización: (a) colocación del detector, (b) colocación del vidrio o la ventana, (c) colocación y ajuste de la tapa.	106
Figura 4.1. Arreglo experimental de medición de la curva I-V con iluminación.	110

Figura 4.2. Configuraciones de medición de curva I-V del detector con dos fotodiodos.	111
Figura 4.3. Esquema de medición con 4 puntas de cada fotodiodo, (a) con una resistencia variable, (b) con una fuente programable.....	112
Figura 4.4. Modelo circuital del detector de dos fotodiodos.....	112
Figura 4.5. Curva I-V de los detectores de dos cuadrantes de la difusión 375 que presentaron respuesta fotovoltaica.	113
Figura 4.6. Curva I-V de los detectores 375-15 y 375-32, de cada fotodiodo (izquierda) y entre fotodiodos (derecha).....	114
Figura 4.7. Ensayo FIB con medición de resistencia in-situ. (a) Zona aislada para el ensayo, (b) contactos de medición (c) profundidad atacada, (d) imágenes SEM durante el ataque.....	115
Figura 4.8. Posición en la oblea de los detectores caracterizados de dos cuadrantes de la difusión 389, (a) cara frontal espejada, (b) cara posterior.....	115
Figura 4.9. Curva I-V de cada fotodiodo de los detectores de dos cuadrantes de la difusión 389	116
Figura 4.10. Curva I-V entre áreas activas de los detectores de dos cuadrantes de la difusión 389.	116
Figura 4.11. Inspección visual de la barrera de SiO ₂ de los detectores de dos cuadrantes de la difusión 389 en el microscopio óptico.....	117
Figura 4.12. Curva I-V de los fotodiodos de los detectores de cuatro cuadrantes de la difusión 387, (a) con 1 mm y (b) con 2 mm de separación entre fotodiodos.....	118
Figura 4.13. Curva I-V entre los fotodiodos de los detectores de cuatro cuadrantes elaborados en la difusión 387, (a) con 1 mm de separación entre fotodiodos, (b) con 2 mm de separación entre fotodiodos.....	118
Figura 4.14. (a) Detectores de cuatro cuadrantes elaborados en la difusión 389, (b) inspección visual con microscopio óptico.....	119
Figura 4.15. Curva I-V de los fotodiodos de los detectores de cuatro cuadrantes elaborados en la difusión 389.	119
Figura 4.16. Curva I-V del 389-27, (a) de cada fotodiodo y (b) entre fotodiodos.	120
Figura 4.17. Fotodiodos triangulares, difusión 387.....	121
Figura 4.18. Curva I-V fotodiodos triangulares difusión 387 sin SiO ₂	121
Figura 4.19. Curvas I-V de los detectores triangulares con referencia rectangular y separación de 1mm.	122
Figura 4.20. Detectores con fotodiodos triangular y referencia rectangular, difusión 389.	122

Figura 4.21. Curvas I-V de los fotodiodos triangular y rectangular de los detectores elaborados en la difusión 389.	122
Figura 4.22. Curvas I-V entre fotodiodos y ampliación en los valores cercanos a 0 A.	123
Figura 4.23. Curva I-V con vidrio y sin vidrio de detectores 389-06 y 389-27, de dos y cuatro cuadrantes.	123
Figura 4.24. (a) Sensor de un eje con ventana cuadrada y detector de dos cuadrantes, (b) sensor de dos ejes con ventana circular y detector de cuatro cuadrantes.	125
Figura 4.25. Curva I-V del detector de dos cuadrantes, con ventanas circular y cuadrada.	125
Figura 4.26. Curva I-V del detector de cuatro cuadrantes 389-27 con ventanas cuadrada y circular.	126
Figura 4.27. Equipo de medición de Respuesta Espectral.	127
Figura 4.28. Respuesta espectral de los detectores 389-06, 387-06 y 389-20.	128
Figura 5.1. Representación esquemática de la variación del ángulo de incidencia de la luz en el sensor al mantener el simulador solar fijo.	132
Figura 5.2. Base electromecánica desarrollada.	133
Figura 5.3. Esquema de medición de respuesta angular para controlar la posición del dispositivo y adquirir los datos.	133
Figura 5.4. Equipamiento utilizado para la medición de respuesta angular: simulador solar, SMU, base electromecánica y programa desarrollado.	134
Figura 5.5. Posición del sensor en la base para diferentes ángulos de rotación, (a) con detector de dos cuadrantes y (b) detector de cuatro cuadrantes; (i) $\varphi = 0^\circ$, (ii) $\varphi = 90^\circ$, (iii) $\varphi = 180^\circ$, (iv) $\varphi = 270^\circ$	135
Figura 5.6. Configuraciones de medición en paralelo de la I_{CC} de cada fotodiodo de un detector con dos fotodiodos.	135
Figura 5.7. Análisis de sombra por la tapa del soporte en el detector con vidrio.	136
Figura 5.8. Respuesta angular detector de dos cuadrantes con vidrio en $\varphi = 0^\circ$	137
Figura 5.9. (a) Respuesta angular normalizada del detector de dos cuadrantes con vidrio en $\varphi = 0^\circ$, normalizada con respecto de la I_{CC} en $\vartheta = 0^\circ$, (b) error direccional.	137
Figura 5.10. Respuesta angular detector de cuatro cuadrantes con vidrio en $\varphi = 0^\circ$	138
Figura 5.11. (a) Respuesta angular normalizada del detector de cuatro cuadrantes con vidrio, normalizada con respecto de la I_{CC} en $\vartheta=0^\circ$, (b) error direccional.	138
Figura 5.12. Distribución en diagrama de caja y bigotes de las series de medición de I_{CC} del detector de dos cuadrantes, al utilizar la ventana cuadrada y la circular, variando el ángulo de elevación y rotación de la base para determinar la incidencia normal $\vartheta = 0^\circ$	140

Figura 5.13. Distribución en diagrama de caja y bigotes de las series de medición de I_{CC} del detector de cuatro cuadrantes, al utilizar una ventana cuadrada y una circular, variando el ángulo de elevación y rotación de la base para determinar $\vartheta_i = 0^\circ$	141
Figura 5.14. Respuesta angular de la I_{CC} de cada fotodiodo del sensor de un eje con ventana cuadrada (izquierda) y circular (derecha), fotodiodo A en azul y B en naranja.	142
Figura 5.15. Respuesta angular de la I_{CC} de cada fotodiodo del sensor de dos ejes con ventana cuadrada.	143
Figura 5.16. Respuesta angular de la I_{CC} de cada fotodiodo del sensor de dos ejes con ventana circular.....	143
Figura 5.17. Función de transferencia del sensor de un eje fabricado, con ventana cuadrada y con ventana circular.	144
Figura 5.18. Funciones de transferencia de cada eje de medición del sensor de dos ejes, con ventanas (a) cuadrada y (b) circular.	145
Figura 5.19. Respuesta angular del sensor de un eje en azimut 90° y 270° , (a) respuesta de al coseno de la I_{CC} , (b) error direccional.	152
Figura 5.20. Comparación de la I_{CC} medida con la simulada, en $\varphi = 0^\circ$ y 180° , del sensor de un eje con ventana cuadrada y ventana circular.	153
Figura 5.21. Función de transferencia H del sensor de un eje con ventana cuadrada (izquierda) y circular (derecha).	154
Figura 5.22. Comparación de la respuesta medida del sensor de dos ejes con ventana cuadrada con la respuesta simulada en posiciones azimutales de interés.	155
Figura 5.23. Comparación de las funciones de transferencia de cada eje de medición del sensor de dos ejes con detector de cuatro cuadrantes con ventana cuadrada....	155
Figura 5.24. Comparación de la respuesta medida del sensor de dos ejes con ventana circular con la respuesta simulada en posiciones azimutales de interés.	156
Figura 5.25. Comparación de las funciones de transferencia de cada eje de medición del sensor de dos ejes con detector de cuatro cuadrantes con ventana circular.	157
Figura 6.1. Cinturones de radiación de Van Allen de la Tierra.	159
Figura 6.2. Etapas del ensayo de ambiente espacial.	160
Figura 6.3. Estructura del dispositivo bajo estudio.	161
Figura 6.4. Espectro integral de PKA en energía y en profundidad para cuatro energías de umbral (10 eV, 100 eV, 1 keV y 10 keV) para cuatro casos de simulación de irradiación posterior en el laboratorio entre 10 y 20 MeV y una simulación de irradiación frontal espacial del sensor con un vidrio de 1 mm.	162
Figura 6.5. Simulaciones para obtener la energía y el K.	163

Figura 6.6. a) Línea EDRA instalada en el acelerador TANDAR, b) diagrama de la lía EDRA.	164
Figura 6.7. Pasos de la irradiación de los sensores.	165
Figura 6.8. a) Portamuestras con los sensores en la cámara de irradiación, b) alineación de los sensores con CF1 y ventana en el escudo de aluminio.	165
Figura 6.9. Determinar la fluencia recibida en la CF8.	167
Figura 6.10. Caracterización de la degradación de la respuesta eléctrica de sensores con un solo fotodiodo mediante curvas I-V.	168
Figura 6.11. Curvas I-V normalizadas antes y después de irradiar normalizadas con la I_{CC} antes de irradiar de los sensores con dos fotodiodos.	169
Figura 6.12. Respuesta espectral sensores con un solo fotodiodo.	170
Figura 6.13. Respuesta espectral sensores irradiados con el método CAC.	171
Figura 6.14. Respuesta espectral de sensores irradiados con el método JPL.	172
Figura A.1. Sensores solares comerciales: a) Cosine Sun Sensor [1] y b) Fine sun sensor [3] de Bradford Space, c) BiSon64-ET [4] de Lens R&D, d) NCSS-SA05 [13] de NewSpace Systems, e) NanoSense FSS [5] de GomSpace, f) HFSS [12] de LASP y g) Fine Sun Sensor [8] de Redwire Corporation.	180
Figura A.2. a) Sensor solar con componentes comerciales [14], b) FSS diseñado a medida para una misión a Mercurio [15], c) [16].	181
Figura A.3. FSS vista lateral y vista superior, principio de funcionamiento con detectores triangulares. [17]	182
Figura A.4. a) Vista superior FSS con áreas activas triangulares y rectángulo de referencia b) vista transversal c) FSS dos ejes, diseño y sensor terminado. [18, 19]	183
Figura A.5. FSS con fotodiodos triangulares. [20]	183
Figura A.6. FSS con detector de cuatro cuadrantes comercial y ventana circular. [24]	183
Figura A.7. a) FSS de dos ejes con detectores rectangulares [22], b) segmentación del FOV para lograr mayor resolución y c) FSS de dos ejes con segmentación del FOV [23].	184
Figura A.8. FSS con rendija diseñada para compensar la no linealidad del detector [25]	184
Figura A.9. a) FSS con encapsulado maquinado que sombrea el detector [27] b) y c) FSS de dos ejes con tres detectores y ventana en forma de cruz [28].	185
Figura A.10. FSS con detector CCD y rendija en forma de N [29].	185
Figura A.11. FSS con detector APS comercial a) [30] b) [31] c) [32, 33].	186
Figura A.12. FSS donde el APS forma parte de un ASCI, a) [34] b) [35].	186
Figura A.13. FSS con detector tipo PSD comercial a) [36] b) [37].	187

Figura A.14. FSS con detector CIGS. [38].....	187
Figura A.15. Sensor solar flexible y con fotodiodos orgánicos impresos. [39]	187
Figura B.1. Máscara 1 ^{er} paso de fotolitografía, definición de la máscara de SiO ₂ , arreglos de 2 y 4 fotodiodos, difusión 387.....	193
Figura B.2. Máscara 2 ^{do} paso de fotolitografía para la definición de los contactos metálicos, arreglos de 2 y 4 fotodiodos, difusión 387.....	194
Figura B.3. Máscara 1 ^{er} paso de fotolitografía, definición de la máscara de SiO ₂ , arreglos de 2 y 4 fotodiodos, difusión 389.....	194
Figura B.4. Máscara 2 ^{do} paso de fotolitografía para la definición de los contactos metálicos, arreglos de 2 y 4 fotodiodos, difusión 387.....	195
Figura B.5. Máscaras de fotolitografía para definir la metalización de las ventanas circular y cuadrada.	195
Figura B.6. Máscaras de fotolitografía para definir la metalización de las ventanas para sensores con fotodiodo triangular grande y chico.	196

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Métodos de medición de sensores de actitud [5].	24
Tabla 1.2. Valores típicos de sensores solares [5].	25
Tabla 2.1. Comparación de los diseños.	70
Tabla 2.2. Parámetros considerados en las simulaciones.	75
Tabla 3.1 Parámetros del proceso de oxidación seca.	88
Tabla 3.2. Pasos y valores de proceso de difusión a partir de fuente líquida POCl_3 .	97
Tabla 3.3. Resistencia de capa de las difusiones realizadas.	98
Tabla 3.4. Parámetros para para programar el corte.	104
Tabla 4.1. I_{cc} y J_{cc} extraídas de las curvas I-V de los detectores sin vidrio y con vidrio.	124
Tabla 4.2. 389-06, I_{cc} y J_{cc} para los dos diseños de ventana.	125
Tabla 4.3. 387-27: I_{cc} para las dos geometrías de la ventana.	126
Tabla 4.4. I_{cc} calculada a partir de la RE y la I_{cc} .	128
Tabla 5.1. Estadística de los valores medidos en $\vartheta = 0^\circ$ del sensor de un eje.	140
Tabla 5.2. Estadística de los valores medidos en $\vartheta = 0^\circ$ del sensor de dos ejes.	141
Tabla 5.3. I_{cc} en $\vartheta = 0^\circ$, razón entre fotodiodos del sensor de un eje: descubierto, con vidrio y con ventanas.	146
Tabla 5.4. Razón entre la I_{cc} de cada fotodiodo del detector de cuatro cuadrantes.	146
Tabla 5.5. Valores calculados de J_{cc} y área iluminada del sensor de un eje con ventana cuadrada.	148
Tabla 5.6. Valores calculados de J_{cc} y área iluminada del sensor de dos ejes con ventana cuadrada.	149
Tabla 5.7. Valores calculados de J_{cc} y área iluminada del sensor de un eje con ventana circular, considerando un error de alineación de $39 \mu\text{m}$ en x.	150
Tabla 5.8. Valores calculados de J_{cc} y área iluminada del sensor de dos ejes con ventana circular, considerando un error de alineación de $33 \mu\text{m}$ en x y de $-54 \mu\text{m}$ en y.	151
Tabla 6.1. Sensores colocados en cada experimento y sus características.	166

Tabla 6.2. Fluencia calculada a partir de la medición de las CF en cada experimento.	167
Tabla 6.3. Degradación calculada a partir de la caracterización de la curva I-V.	169
Tabla 6.4. Degradación de la I_{CC} de los sensores con dos fotodiodos.	170
Tabla 6.5. Degradación de la I_{CC} , medida a partir de la RE.	171
Tabla 6.6. I_{CC} y degradación calculada a partir de la RE de los sensores con dos fotodiodos.	172
Tabla 6.7. Comparación de resultados obtenidos en RE y en curva I-V.	173
Tabla A.1. Sensores solares comerciales.	180
Tabla A.2. Sensores solares.	188

Capítulo 1

Sensores solares de posición

Un satélite se compone de diversos sistemas, entre los cuales destaca el subsistema de Orientación, Navegación y Control (GNC, por sus siglas en inglés, *Guidance, Navigation & Control*). Este subsistema incluye el Sistema de Determinación y Control de Actitud (ADCS, por su sigla en inglés, *Attitude Determination and Control System*), encargado de medir la orientación del satélite en el espacio (actitud), calcular la actitud deseada y generar las señales de control para los actuadores (como ruedas de reacción o propulsores). [1, 2]

El ADCS es fundamental para el satélite, ya que la actitud influye directamente en el funcionamiento de los componentes del satélite, como los paneles solares, las antenas y los instrumentos científicos. Por ejemplo, los paneles solares deben estar orientados hacia el Sol para maximizar la generación de energía, mientras que las antenas deben apuntar hacia la Tierra o hacia otros satélites para establecer comunicaciones. Una actitud incorrecta puede tener consecuencias graves, como la pérdida de comunicación o el fallo de los instrumentos. El control de actitud es un desafío constante debido a las perturbaciones externas, como el torque gravitatorio o la presión de radiación solar. Para superar estos desafíos, se emplean diversas técnicas de control, como el uso de sensores precisos y algoritmos de control avanzados. [3]

La información de actitud se debe proporcionar de forma continua y con suficiente precisión, a pesar de situaciones adversas tales como eclipses [4]. Los sensores de actitud proporcionan mediciones del estado de actitud real, que se puede medir en forma absoluta (con respecto a un sistema de referencia) o como información relativa (por ejemplo, ángulos dedicados o cambios de actitud). La medición absoluta se basa en la dirección de dos vectores linealmente independientes en el marco de referencia

correspondiente. Los siguientes vectores se pueden medir a bordo: campo magnético de la Tierra, dirección al Sol, dirección a las estrellas, dirección a la Tierra (o el ángulo al horizonte de la Tierra), dirección a los satélites de un sistema de global de navegación por satélite (GNSS) como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). [5]

La elección de los sensores para el ADCS depende de factores como la precisión requerida, el rango de medición, el consumo de energía, el costo y las condiciones ambientales de la misión [4]. Entre los sensores que se utilizan para determinar la actitud y su tasa de cambio se encuentran los sensores de inercia, sensores de Tierra, sensores de horizonte, magnetómetros, receptores GPS, seguidores de estrellas y sensores solares. Para superar las limitaciones de cada sensor, se suele emplear una combinación de sensores de referencia y sensores inerciales. Esta combinación permite obtener una estimación más precisa y robusta de la actitud del satélite [1]. Las necesidades de actitud de los satélites difieren mucho y los requisitos de detección de actitud también son variados [4, 5]. En la Tabla 1.1 se resumen los distintos tipos de sensores que se emplean en el ADCS, el método de medición y sus principales características.

Tabla 1.1. Métodos de medición de sensores de actitud [5].

Método	Ejemplo	Características
Directo	<i>Sensor de estrellas</i>	<i>Tres ejes, sensibilidad alta (25")</i>
	<i>Medición de actitud GNSS</i>	<i>Tres ejes, sensibilidad media</i>
Indirecto	<i>Magnetómetros</i>	<i>Método simple</i>
	<i>Sensor de la Tierra</i>	<i>Alta confiabilidad (0,25° de precisión)</i>
	<i>Sensor solar</i>	<i>Transformación de la medición necesaria</i>
Inercial	<i>Giroscopio</i>	<i>Alineación de actitud Alta sensibilidad en periodos cortos Muy alta resolución angular (1°/h estabilidad, 0,1°/h^{1/2} ruido blanco) Medición independiente de fuentes externas</i>

En particular, los sensores solares son el tipo de sensor de actitud más utilizado en las misiones espaciales. Esto se debe principalmente a que el Sol, a diferencia de la Tierra, se puede considerar como una fuente puntual para la mayoría de las misiones espaciales; su radio angular es casi independiente de la órbita y lo suficientemente pequeño (0,267° a 1 unidad astronómica). Lo anterior simplifica considerablemente el

diseño del sensor y los algoritmos de determinación de actitud. Además, el Sol es lo suficientemente brillante como para detectarlo empleando equipos simples y confiables, sin discriminar entre fuentes y con requerimientos mínimos de energía [1, 3, 6]. Por lado, hay que considerar que los sensores solares requieren campos de visión claros y que pueden sufrir períodos de eclipse tanto de la Tierra como de la Luna [7].

En este capítulo se muestran los principios de operación y funcionamiento de los sensores solares finos desarrollados en esta tesis, necesarios para la comprensión de las caracterizaciones y resultados de los siguientes capítulos. Además, se definen los parámetros eléctricos y electrónicos característicos de las junturas *p-n* que se utilizarán en los capítulos siguientes.

1.1. Clasificaciones y principios de operación

Los sensores solares se pueden clasificar en función del tipo de señal de salida, de qué tan preciso sean o de la tecnología utilizada para medir la posición del Sol. Además, se pueden clasificar en sensores de uno o dos ejes, dependiendo de si pueden determinar una representación bidimensional o tridimensional del vector Sol, respectivamente. En cuanto al tipo de señal de salida, se pueden clasificar como analógicos o digitales. En los sistemas analógicos, la salida es una función continua del ángulo de incidencia, mientras que, en los sistemas digitales, la salida es discreta [8]. Además de esta clasificación, los sensores solares también se diferencian por su precisión, que es el menor cambio en la posición del Sol que el sensor es capaz de detectar [5, 8]. Los sensores gruesos (CSS, por sus siglas en inglés, *Coarse Sun Sensor*) ofrecen una precisión entre 10 y 20°, mientras que los sensores finos (FSS, por sus siglas en inglés, *Fine Sun Sensor*) alcanzan una precisión mucho mayor. Otro de los parámetros que caracterizan a los sensores solares de posición es el campo de visión (FOV, por sus siglas en inglés, *Field Of View*). Los FSS tienen un FOV mediano, con un valor típico de 128°, mientras que los CSS tiene un FOV amplio, cercano a 180°, por lo que generalmente se emplean para maniobrar el satélite para poner el Sol en el FOV del FSS [5, 9]. En la Tabla 1.2, se presentan valores típicos de precisión, consumo de potencia y masa de sensores solares finos y gruesos. [3, 5]

Tabla 1.2. Valores típicos de sensores solares [5].

Parámetros	Sensor solar fino	Sensor solar grueso
Precisión	0,01°	15°
Consumo de potencia	1 W	0 W
Masa	1 kg	0,02 kg
Área de aplicación	Apuntar al Sol	Orientación, modo seguro

Por otro lado, en la literatura existen diferentes alternativas tecnológicas de sensores solares en cuanto a la estructura, configuración y detectores empleados. Con respecto a este último, se reportan detectores del tipo coseno [10], arreglos de fotodiodos [11, 12], CCD (por sus siglas en inglés, *Charge-Coupled Device*) [13, 14, 15], sensores de imagen CMOS [16] o sensores de píxel activo (APS) [17], detectores sensibles a la posición (PSD) [18], entre otros. Se reportan, además, sensores solares con componentes ópticos diseñados a medida de los requerimientos de misiones específicas, como en el trabajo de Boslooper et al. [19] para una misión a Mercurio. A continuación, se mencionan las particularidades de las diferentes tecnologías de detección empleadas en los sensores solares de posición.

Los sensores solares basados en detectores de la ley del coseno o tipo coseno son los más utilizados, son sensores analógicos y se les conoce además como sensor solar grueso (CSS). Este se basa en la variación sinusoidal de la corriente de salida de una celda solar de silicio con ángulo solar como se muestra en la Figura 1.1. Específicamente, el flujo de energía, E , a través de una superficie de área dA con unidad normal se define en la Ec. 1.1, donde P es el vector de Poynting, que proporciona la dirección y la magnitud del flujo de energía para la radiación electromagnética.

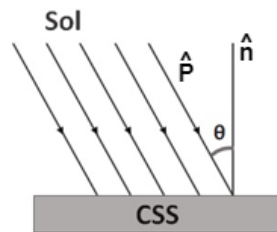


Figura 1.1. Representación esquemática de un sensor solar grueso.

Por lo tanto, la energía depositada en una celda solar y, en consecuencia, la corriente fotogenerada, I , es proporcional al coseno del ángulo de incidencia de la radiación solar, o vector solar, como se muestra en la Ec. 1.2. Las pequeñas pérdidas de transmisión debido a la reflexión de Fresnel, el área efectiva de la celda y la reflexión dependiente del ángulo en la interfaz aire-celda se omiten del modelo simple dado por la Ec. 1.2, [3, 6, 20].

$$E = P \cdot \hat{n} dA \quad (1.1)$$

$$I(\theta) = I(0^\circ) * \cos \theta \quad (1.2)$$

En general, los sensores tipo coseno se colocan en diferentes ubicaciones del satélite para maximizar el campo de visión. Al comparar las mediciones de las corrientes

generadas por las distintas celdas se puede determinar la dirección de mayor iluminación, por lo que se puede tolerar la perturbación causada por el albedo de la Tierra. Con esta medición simple, se pueden lograr precisiones de actitud de 10 a 20°, que son adecuadas para salvaguardar las condiciones térmicas y de energía elementales de un satélite. La simplicidad, robustez e independencia de la actitud satelital real predestinan este principio de medición para la adquisición de actitud y los modos seguros [5].

Utilizando una celda solar o un fotodiodo es posible calcular una representación bidimensional del vector Sol, convirtiéndolo así en un sensor solar de un eje. Este sensor tiene las ventajas comparativas de una buena linealidad en una amplia gama de niveles de iluminación, una constante de tiempo que es independiente del nivel de luz, excelente estabilidad con la temperatura en el modo de funcionamiento de corriente de cortocircuito, alto coeficiente de absorción en el rango visible lo que hace que tenga una buena coincidencia espectral con el Sol y fuentes artificiales típicas usadas en laboratorios, excelente confiabilidad, un amplio rango de temperatura de operación, bajo ruido, robustez y buena resistencia al daño por radiación, si se usa material de alta resistividad [3, 8].

Los sensores solares gruesos son sensores atractivos para satélites pequeños debido a su bajo costo, reducido tamaño y bajo consumo de energía. Estos sensores se utilizan en grandes cantidades para garantizar una cobertura redundante del sensor en toda la esfera de actitud. La ley del coseno se ajusta bien para los ángulos del Sol que van de 0° a aproximadamente 50°, más allá del cual la salida eléctrica se desvía significativamente del valor del coseno. La curva de potencia real versus ángulo se denomina coseno de Kelly. En el caso de estos sensores, se utiliza una tabla de búsqueda para detectar el ángulo de incidencia, basado en datos experimentales en Tierra, para determinar el coseno de Kelly [3, 20].

Un segundo tipo de sensor solar, también analógico, usa una barra o máscara para sombrear una porción de una o más de un arreglo o conjunto de fotodiodos (Figura 1.2), siendo la segunda opción la más reportada en la bibliografía. Las diferentes configuraciones pueden dar como resultado un sensor de un eje, como en la Figura 1.2(a), o un sensor de dos ejes, como en la Figura 1.2(b), con campo de visión y precisión variables [6]. Los arreglos de fotodiodos pueden ser elaborados en una misma oblea de silicio y luego semi cortados o difundiendo barreras no conductoras en la capa superior de la juntura, también se pueden elaborar con celdas independientes ubicadas una al lado de la otra. Con cuatro celdas ubicada en dos direcciones perpendiculares en

el plano, se puede sensor dos ejes de movimiento. Esto se conoce en la literatura como detectores de cuatro cuadrantes [21, 22]. La influencia de la luz difusa del albedo se puede eliminar utilizando filtros o detectores de espectro selectivo como es el caso de los detectores de radiación ultravioleta [23]. El sensor solar comercial con un detector de cuatro cuadrantes que exhibe la mejor relación entre FOV y precisión, tiene una precisión de $0,2^\circ$ en un FOV de 64° [24].

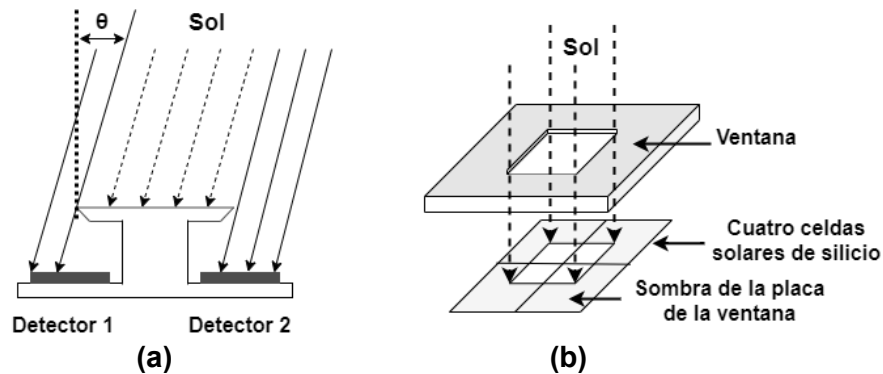


Figura 1.2. (a) Sensor solar con máscara de un eje. (b) Sensor solar de dos ejes con máscara, la luz del Sol es normal a la ventana si las salidas de las cuatro celdas solares son iguales.

Un tercer tipo de sensor solar analógico, considerablemente menos reportado en la literatura, se basa una máscara y un detector sensibles a la posición (PSD, por sus siglas en inglés) [18]. Los PSD se basan en el efecto fotovoltaico lateral, planteado por primera vez en 1957 por Wallmark en [25], y utilizan la resistencia superficial de los fotodiodos. La tensión entre dos contactos óhmicos en el área activa de un fotodiodo está relacionada con la posición del centro del haz de luz incidente, y es independiente de la intensidad de la luz y sus variaciones. Se puede medir la posición en dos ejes simultáneamente usando dos contactos adicionales colocados en forma perpendicular a los anteriores. En la Figura 1.3, se muestra una vista esquemática de la sección transversal de un PSD de una dimensión, así como su principio de funcionamiento.

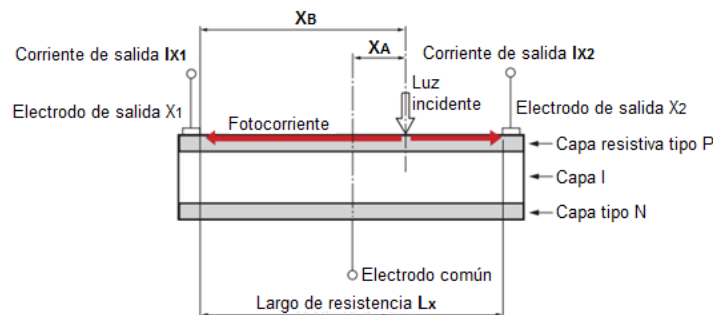


Figura 1.3. Sección transversal y principio de funcionamiento de un PSD [26].

La Ec. 1.3 relaciona las corrientes fotogeneradas con la posición del haz de luz y el largo del área fotosensible [21, 26].

$$\frac{I_{X2} - I_{X1}}{I_{X2} + I_{X1}} = \frac{2X_A}{L_X} \quad (1.3)$$

Los PSD tienen la ventaja de no estar segmentados, tienen una salida continua con alta resolución y respuesta rápida. Debido a la naturaleza del sensor PSD, no es necesario utilizar un algoritmo de centroide; las lecturas analógicas del sensor ya son el centroide de la luz incidente, ahorrando tiempo de procesamiento en el satélite. Sin embargo, los sensores basados en PSD no han sido ampliamente utilizados como sensores solares para aplicaciones espaciales [27].

Por otro lado, el uso de máscaras y arreglos de fotodiodos se reporta también sensores del tipo digital. Este es el caso del primer tipo de sensor solar que se reporta en la literatura, en el cual se hace pasar la señal luminosa por una serie de rendijas que están dispuestas de manera que cuando la luz incide en los fotodetectores se observa un patrón de luces y sombras, que responde a un código binario el cual se corresponde con la posición del Sol (Figura 1.4). El código más empleado es el código Grey, aunque en la bibliografía también se hace referencia al código *V-brush* [6, 8].

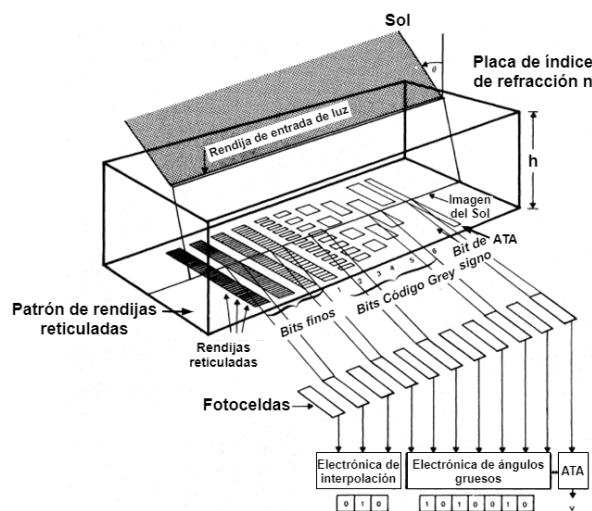


Figura 1.4. Detalles del componente de medición de un sensor solar digital [6].

Con la evolución de la tecnología de sistemas microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés, *MicroElectroMechanical Systems*), surgieron sensores solares que utilizan sensores de píxeles activos (APS) o chips de carga acoplada (CCD). La tecnología MEMS puede ayudar a reducir el tamaño y el consumo de energía de los sensores solares digitales. Estos sensores solares utilizan sensores de imágenes para

capturar la imagen del Sol, a la cual se le aplican técnicas de procesamiento para extraer información del vector solar. Usando la geometría y la ubicación del centroide, se puede calcular el ángulo del satélite con respecto al Sol. Los sensores tipo APS son mucho más tolerantes a la radiación que los sensores tipo CCD. Con este tipo de sensores se pueden obtener precisiones del orden de $0,01^\circ$. [3, 9, 27, 28]

En el Anexo A se presenta el estado de la técnica detallado, tanto de sensores comerciales como de desarrollos presentados en el área académica y de investigación.

1.2. Desarrollo de sensores solares para aplicaciones espaciales en Argentina

1.2.1. Antecedentes

En Argentina, el Departamento Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) tiene una vasta experiencia en el desarrollo de sensores fotovoltaicos para medir la radiación global y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) a nivel terrestre [29, 30], así como en el desarrollo de CSS para aplicaciones espaciales, los cuales se diseñan a la medida de los requisitos de cada misión espacial. Estos sensores tienen una herencia espacial de más de 20 años y 2 500 000 horas de vuelo hasta agosto de 2024 [31, 32, 33, 34]. Cabe destacar que el DES es el único grupo de investigación en el país que desarrolla instrumentos de medición de radiación solar y sensores solares de posición.

Las actividades del DES en el área de la conversión fotovoltaica comenzaron en 1986, cuando se inició el montaje de un laboratorio para la elaboración de obleas de silicio (Si) para uso fotovoltaico y electrónico. En 1992, se adquirió e instaló un horno de difusión con el cual fue posible elaborar celdas solares de Si a partir de obleas comerciales y obleas provenientes de lingotes crecidos en CNEA. Durante los años siguientes, se alcanzó un buen control y repetitividad en los diferentes procesos de fabricación de las celdas solares como son la difusión de dopantes, el depósito de contactos mediante fotolitografía, técnicas antirreflectantes y técnicas de caracterización. Se investigaron también modelos teóricos para la simulación, diseño y caracterización óptica y eléctrica de los dispositivos. En 1997 se alcanzaron, por primera vez en el país, eficiencias de alrededor del 17% con radiación AM 1.5 (espectro de radiación solar terrestre) [35].

En 1995, la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y CNEA firmaron un convenio de cooperación, con el objeto de diseñar y poner en práctica conjuntamente

un experimento de celdas solares de silicio monocristalino, fabricadas en el Departamento Energía Solar de la CNEA, en un satélite argentino. Como parte de ese acuerdo, se desarrollaron técnicas de caracterización electrónica de obleas difundidas, para la determinación de la vida media y la longitud de difusión de portadores minoritarios. Se realizó un estudio teórico del daño por irradiación de celdas solares con protones y se llevaron a cabo experiencias de bombardeo de celdas con protones (de 10 MeV) en el ciclotrón del Centro Atómico Ezeiza y con neutrones en el reactor RA-1 del Centro Atómico Constituyentes. Las celdas solares de c-Si fabricadas en el Laboratorio Fotovoltaico del DES, formaron parte del “Primer experimento de celdas solares argentinas en el espacio”, a bordo del satélite SAC-A (proyecto de la CONAE) que fue lanzado en 1998. El satélite llevó dos experiencias relacionadas con las celdas solares nacionales, Figura 1.5, por un lado, dos pequeños paneles con un total de 14 celdas con el objetivo de estudiar su comportamiento eléctrico en el ambiente espacial y, por otro lado, cuatro celdas individuales colocadas en diferentes caras del satélite, que se incluyeron como sensores solares de posición para orientar la posición del satélite con respecto al Sol. Todas las celdas tenían un área activa de 460 mm² y estaban protegidas con un vidrio dopado con cerio. El análisis de los datos por telemetría del satélite SAC-A mostró un correcto funcionamiento de los sensores solares de posición y de todas las celdas incluidas en los paneles de ensayo. [36]

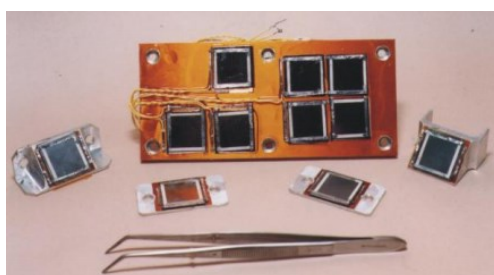


Figura 1.5. Panel y sensores gruesos de ingeniería del satélite SAC-A.

A partir de este hito, se firmó un convenio de cooperación entre CONAE y CNEA para que el DES estuviese a cargo del desarrollo de los paneles y sensores solares de las siguientes misiones espaciales programadas. Este convenio permite disponer en el país de las herramientas de diseño y de técnicas de fabricación, caracterización, calificación y ensayo de paneles y sensores solares para usos espaciales. En el año 2011 se lanzó la misión satelital Aquarius/SAC-D, que utilizó paneles solares integrados y ensayados por CNEA. En sus esquinas, los paneles llevaban doce CSS elaborados en el DES. En base a los requisitos de tamaño y de corriente de cortocircuito se diseñaron y fabricaron dispositivos de 12 mm de lado, con área activa circular de 50 mm² y dedos metálicos de 100 µm de ancho, dispuestos en forma radial, como se muestra en la Figura 1.6. El

campo de visión de este diseño es de 180° y la precisión de los sensores es de 5° [37, 38]. Esta misión fue el producto de una cooperación entre CONAE y la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) de EE. UU.; contó además con revisiones internacionales tanto de CONAE como de representantes del Centro de Vuelo Espacial Goddard (*Goddard Space Flight Center*, GSFC) y el Laboratorio de propulsión a chorro (*Jet Propulsion Laboratory*, JPL) de la NASA [39, 40].

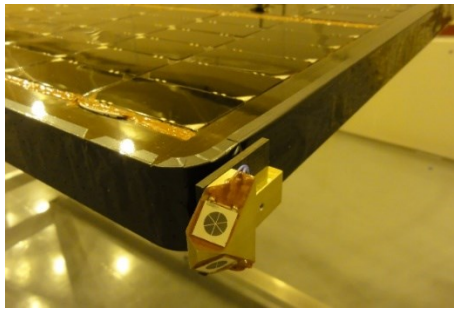


Figura 1.6. Sensor de posición integrado al panel de vuelo del satélite SAC-D.

Esta tecnología también se empleó para la elaboración de los CSS para los satélites SAOCOM 1A y SAOCOM 1B (Figura 1.7), los cuales fueron diseñados a medida de los requisitos de la misión. Estas misiones espaciales se lanzaron en octubre de 2018 desde la Base Aérea de Vandenberg (EE. UU.), y en agosto de 2020 desde Cabo Cañaveral en la Florida (EE. UU.), respectivamente. [41, 42]

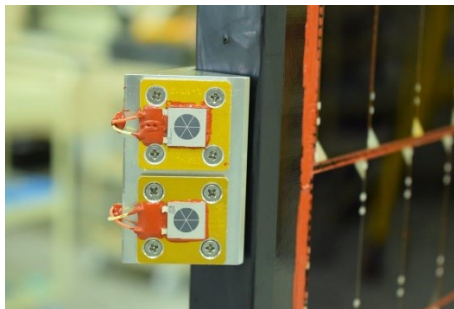


Figura 1.7. Sensores solares gruesos montados en el panel solar del satélite SAOCOM 1A.

Otros proyectos de la industria aeroespacial donde se han empleado los CSS elaborados en el DES son: el Proyecto cohete - sonda VS-30, a cargo de CONAE y la Agencia Espacial Brasileña (AEB) y lanzado en 2007 desde Natal (Brasil); el satélite brasileño de observación de la Tierra, Amazonia-1 [34, 43], que se lanzó en febrero de 2021; el pequeño satélite argentino Cube Bug-2, de la empresa Satellogic, y el satélite SABIA-Mar de CONAE [44]. En 2020, se llevó a cabo la provisión y calificación de CSS para INVAP, que constituyó la primera exportación de material de vuelo de Argentina a Europa.

1.2.2. Motivación y objetivos

En base a la experiencia adquirida en los procesos de fabricación de sensores solares gruesos y que fueron probados exitosamente en órbita en estos años, se decidió continuar con el desarrollo de sensores solares de posición para lograr dispositivos capaces de determinar la posición del Sol con mejor precisión que los CSS elaborados hasta el momento en el DES, pero sin una pérdida significativa del FOV. Una de las razones para desear un amplio FOV, es que se requerirá menor cantidad de sensores para cubrir toda la esfera celeste, reduciendo los costos del satélite [45].

Tomando como referencia la Figura 1.2(b), se planteó como hipótesis que, si se desarrollan sensores solares compuestos por una ventana para direccionar la luz y una matriz de fotodiodos de silicio integrados como detector, utilizando la tecnología disponible en CNEA para la elaboración de celdas solares de silicio y de micro dispositivos, se puede medir la posición del Sol con una precisión de 1° , mejor que la que se logra con los CSS desarrollados en el DES.

Los objetivos específicos de este trabajo son diseñar, fabricar y caracterizar sensores solares finos de posición para aplicaciones espaciales, formados por una ventana para direccionar la luz y una matriz de fotodiodos integrados como detector, utilizando la tecnología de elaboración de celdas solares y técnicas de microfabricación disponibles en CNEA.

La metodología de trabajo propuesta para el desarrollo de los sensores se muestra en la Figura 1.8. Como primer paso se propone diseñar y simular la arquitectura deseada. En base a las conclusiones a las que se arriben en el proceso de diseño, pasar a la segunda etapa de fabricación del detector y la ventana. Una vez terminado el sensor, estos se caracterizan eléctricamente y se compara su respuesta con la simulada inicialmente. A partir de los resultados obtenidos en la caracterización, si es necesario se ajustan parámetros en el diseño y/o fabricación y se vuelven a seguir los pasos descritos hasta obtener un dispositivo final que cumpla con los requisitos planteados en el diseño.

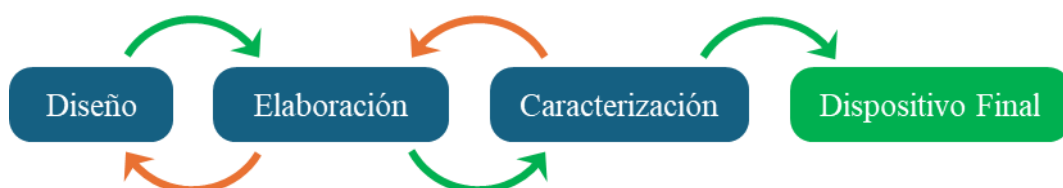


Figura 1.8. Metodología de trabajo para obtener el dispositivo final.

Este desarrollo contribuye al Plan Espacial Nacional al aumentar la oferta de productos que se puede suministrar a la industria espacial nacional. También contribuye a otras líneas de trabajo del DES-CNEA, como los seguidores solares terrestres para la medición y caracterización de la radiación solar [46, 47].

1.3. Propiedades físicas de los materiales y dispositivos fotovoltaicos

Los detectores propuestos consisten en arreglos de fotodiodos. Éstos, al igual que las celdas solares, son dispositivos semiconductores que al ser iluminados producen una respuesta eléctrica. Su operación implica tres procesos fundamentales: generación de portadores por la luz incidente, transporte de los portadores e interacción de la corriente con el circuito externo para proporcionar la señal de salida. El semiconductor más utilizado en la fabricación de celdas solares es el silicio debido a que tiene una base tecnológica bien establecida por su uso en microelectrónica, no es tóxico, se encuentra entre los elementos más abundante en la corteza terrestre

Los semiconductores son materiales cuyas bandas de energía de valencia (BV) y de conducción (BC) se encuentran separadas por una banda de energías prohibidas o "gap". La menor energía de la BC se denomina E_C y la mayor energía de la BV se denomina E_V . La energía de la banda prohibida, E_G , es la diferencia entre E_C y E_V , y en un semiconductor es del orden de 1 eV. Desde un punto de vista físico, E_G es la energía necesaria para romper un enlace covalente en el semiconductor y liberar un electrón a la banda de conducción, dejando una vacancia o hueco en la banda de valencia.

La cantidad de electrones (n) y huecos (p) libres en un semiconductor en equilibrio, Ec. 1.4 y 1.5, queda definida por la función densidad de estados permitidos, $g(E)$, y la función de ocupación, $f(E)$, que responde a la función de distribución de Fermi-Dirac. El análisis gráfico de esta relación se muestra en la Figura 1.9(a).

$$n = \int_{E_C}^{E_{superior}} g_C(E) f(E) dE \quad (1.4)$$

$$p = \int_{E_{inferior}}^{E_V} g_V(E) [1 - f(E)] dE \quad (1.5)$$

$$g_C(E) = 4\pi \frac{(2m_n^*)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \sqrt{E - E_C}, \quad E \geq E_C \quad (1.6)$$

$$g_V(E) = 4\pi \frac{(2m_p^*)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \sqrt{E_V - E}, \quad E \leq E_V \quad (1.7)$$

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}} \quad (1.8)$$

En un semiconductor intrínseco, *Figura 1.9(a)*, hay igual concentración de electrones que de huecos, $n = p = n_i$ y se puede aplicar la relación $n \cdot p = n_i^2$. En este caso, el nivel de Fermi (E_F), que indica 50% de probabilidad de ocupación, se encuentra cerca de la mitad de la banda prohibida y se identifica como E_i .

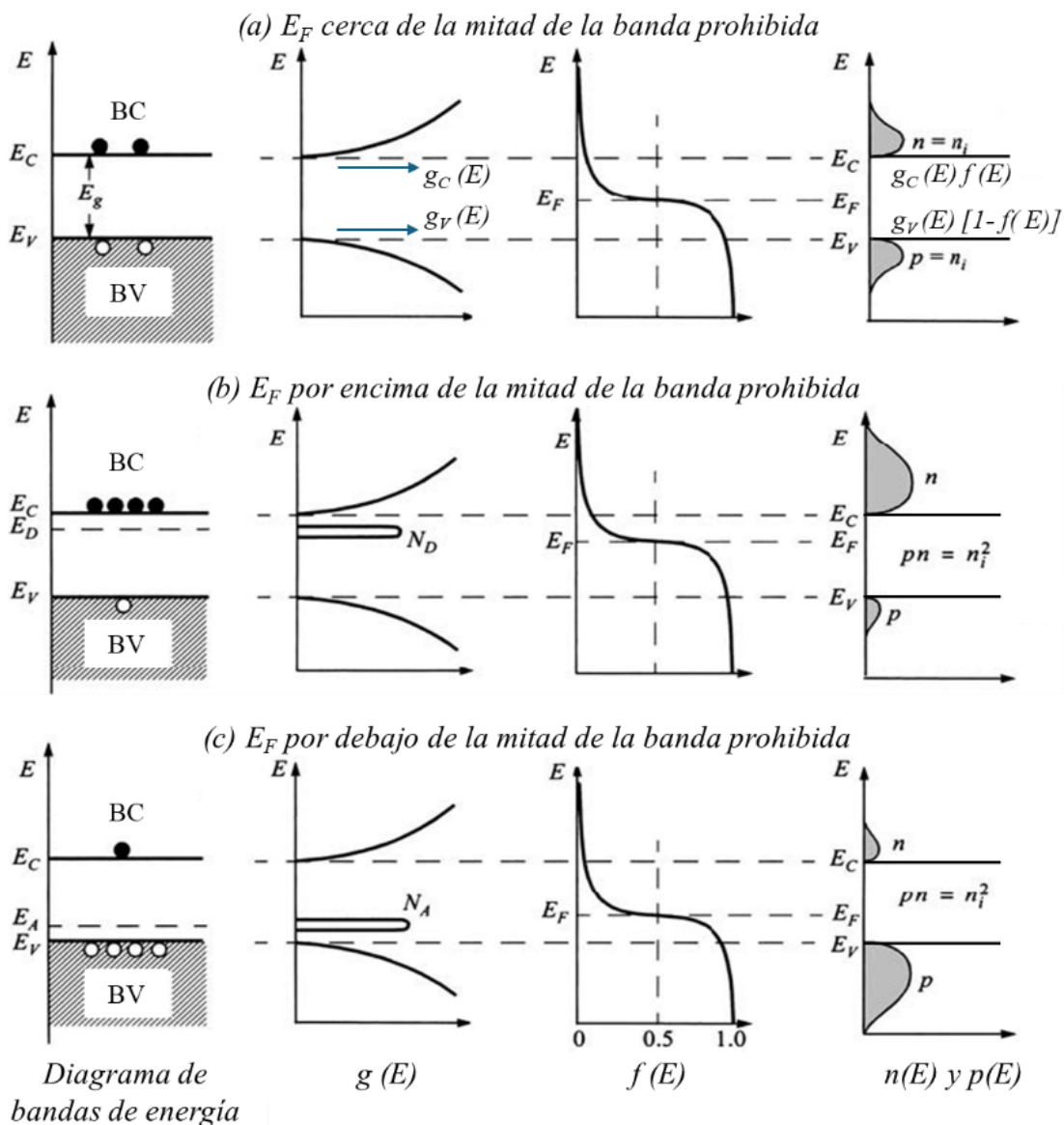


Figura 1.9. (a) Semiconductor intrínseco, E_F cerca de la mitad de la banda prohibida, (b) semiconductor dopado tipo n, (c) semiconductor dopado tipo p. De izquierda a derecha: diagrama de bandas, densidad de estados, distribución de Fermi y concentración de portadores. [48, 49]

En un semiconductor tipo n existe una mayor concentración de electrones que de huecos y el nivel de Fermi se encuentra entre E_i y E_C , *Figura 1.9(b)*. Por otro lado, en un semiconductor tipo p existe una mayor concentración de huecos que de electrones y el nivel de Fermi se encuentra entre E_i y E_B , *Figura 1.9(c)*. Un semiconductor se considera no degenerado si E_F se encuentra en alguna zona de la banda prohibida alejado al menos $3kT$ de los bordes de las bandas. En un semiconductor no degenerado, las Ec. 1.4 y 1.5 se pueden simplificar a las Ec. 1.9 y 1.10.

$$n = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}} \quad (1.9)$$

$$p = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}} \quad (1.10)$$

Las concentraciones de electrones o huecos en el material se pueden incrementar mediante un proceso de dopaje, que consiste en la introducción controlada de impurezas. Los átomos con un electrón de valencia más que el silicio, aquellos que pertenecen al grupo VA de la tabla periódica (P, As, Sb, Bi), se conocen como impurezas donoras. Estos se utilizan para producir semiconductores de tipo n . Por otro lado, los átomos de los elementos del grupo III A de la tabla periódica (B, Al, Ga, In) tienen un electrón de valencia menos que el silicio, y se emplean como impurezas aceptoras para generar semiconductores de tipo p . El tipo de semiconductor resultante (n o p) depende de la concentración relativa de impurezas donoras y aceptoras. La concentración de impurezas ionizadas de tipo donoras se denomina N_D y la concentración de impurezas aceptoras es N_A .

En equilibrio térmico y suponiendo que todas las impurezas están ionizadas, se plantea la ecuación de neutralidad de carga, Ec. 1.11, que mantiene la relación general entre la concentración de impurezas y portadores:

$$p - n + N_D - N_A = 0 \quad (1.11)$$

Por ejemplo, si $|N_D - N_A| \approx N_D \gg n_i$, entonces $n = N_D$ y $p = n_i^2/n$ y estamos en presencia de un semiconductor tipo n . Por otro lado, si $|N_D - N_A| \approx N_A \gg n_i$, entonces $p = N_A$ y $n = n_i^2/p$ y estamos en presencia de un semiconductor tipo p .

Solo cuando un semiconductor es perturbado tiene lugar la acción de los portadores y pueden fluir las corrientes dentro y fuera del semiconductor. En condiciones normales de operación tienen lugar tres tipos fundamentales de respuesta de los portadores: arrastre, difusión y recombinación – generación, los cuales ocurren simultáneamente dentro del semiconductor. Por ejemplo, cuando un semiconductor es expuesto a la luz,

los fotones incidentes pueden excitar los electrones de la banda de valencia, siempre que su energía sea mayor que la E_G del semiconductor. Si el fotón es absorbido, un electrón pasa a la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia. Así, la luz incidente genera pares electrón-hueco, que se recombinan rápidamente mediante diversos procesos, emitiendo la energía absorbida en forma radiativa, térmica o excitando a otro electrón. El objetivo de los dispositivos fotovoltaicos es evitar esta recombinación y aprovechar la energía absorbida para un circuito externo al dispositivo.

A continuación, se definen las ecuaciones básicas que determinan las características ideales de los dispositivos semiconductores, las cuales se emplean para resolver los problemas de dispositivos de naturaleza eléctrica.

En primer lugar, se detallan las ecuaciones de continuidad, Ec. 1.12 y 1.13, que tienen en cuenta todos y cada una de las acciones de los portadores que dan lugar a un cambio de las concentraciones de los portadores con el tiempo: arrastre, difusión, recombinación térmica, generación térmica o algún otro tipo de respuesta. Estas se establecen invocando el requisito de conservación de la carga.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot J_N + \left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\substack{\text{térmica} \\ R-G}} + \left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\substack{\text{otros} \\ \text{procesos}}} \quad (1.12)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot J_P + \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{\substack{\text{térmica} \\ R-G}} + \left. \frac{\partial p}{\partial t} \right|_{\substack{\text{otros} \\ \text{procesos}}} \quad (1.13)$$

A partir de las ecuaciones de continuidad, se deducen las ecuaciones de difusión de portadores minoritarios:

$$\frac{\partial \Delta n_p}{\partial t} = D_N \frac{\partial^2 \Delta n_p}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n} + G_L \quad (1.14)$$

$$\frac{\partial \Delta p_n}{\partial t} = D_P \frac{\partial^2 \Delta p_n}{\partial x^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} + G_L \quad (1.15)$$

Para completar el análisis se debe considerar la ecuación de Poisson, Ec. 1.16, que relaciona el campo eléctrico con la densidad de carga. Donde ρ es la densidad de carga (carga/cm³), Ec. 1.17, K_S es la constante dieléctrica del semiconductor y ϵ_0 la permitividad del vacío, considerando que las impurezas están totalmente ionizadas de modo que todas contribuyen a la densidad de carga.

$$\nabla \cdot \mathcal{E} = \frac{\rho}{K_S \epsilon_0} \quad (1.16)$$

$$\rho = q (p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (1.17)$$

En las Ec. 1.18 y 1.19 se definen la densidad de corriente de electrones, J_N , y de huecos, J_P , que describen el movimiento de portadores debido a la acción de un campo eléctrico (corriente de arrastre) y al gradiente de concentración de portadores (corriente de difusión). Donde $D_P = \mu_p kT/q$ es el coeficiente de difusión para huecos y μ_p es la movilidad, esto se obtiene de la relación de Einstein para los huecos [49]. La densidad total de corriente (J) en condiciones estacionarias, Ec. 1.20, es la suma de las densidades de corriente de electrones y de huecos.

$$J_N = q\mu_n n \mathcal{E} + qD_N \nabla n \quad (1.18)$$

\downarrow arrastre \downarrow difusión

$$J_P = q\mu_p p \mathcal{E} - qD_P \nabla p \quad (1.19)$$

$$J = J_N + J_P \quad (1.20)$$

1.3.1. Características de la juntura $p-n$

Los dispositivos fotovoltaicos, en particular las celdas fotovoltaicas y los fotodiodos, consisten básicamente en diodos de juntura $p-n$ de un material semiconductor. En esta sección se mencionan las propiedades básicas de la juntura $p-n$, en condiciones de oscuridad e iluminación.

La juntura $p-n$, como lo indica su nombre, está formada por la unión de dos semiconductores uno tipo p y otro tipo n ; si ambos semiconductores son del mismo material, esta se denomina homojuntura. Como resultado la juntura $p-n$ tiene una asimetría electrónica en su estructura. En la Figura 1.10(a) se ven dos regiones de materiales semiconductores de tipo p y n , que están uniformemente dopados y físicamente separados antes de que se forme la juntura. En cada parte aislada hay neutralidad de carga. En el semiconductor tipo n , la alta concentración de electrones libres es compensada por los átomos donores ionizados con carga positiva. En el tipo p , los huecos son los portadores minoritarios y la carga positiva de los huecos es compensada por la carga negativa de los átomos aceptores ionizados.

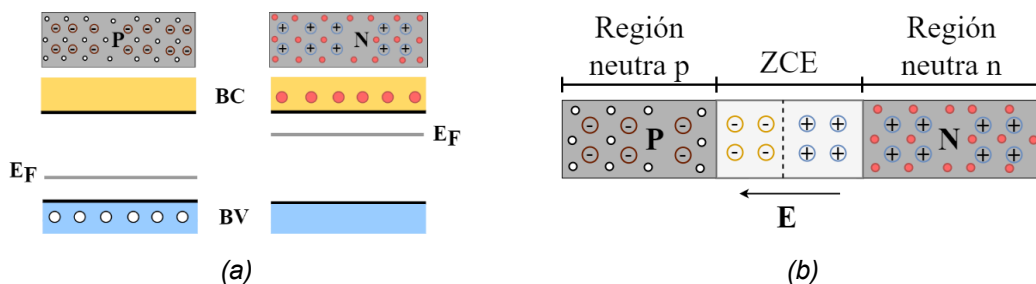


Figura 1.10. (a) Representación esquemática de semiconductores tipo n y tipo p aislados y su correspondiente diagrama de bandas. (b) Juntura $p-n$.

Al formarse la juntura p - n , Figura 1.10(b), los gradientes de concentración de portadores en la juntura provocan la difusión de los portadores mayoritarios y se produce un reacondicionamiento de cargas. Debido a la difusión y recombinación de los portadores mayoritarios, se genera una zona despoblada de cargas móviles en la cercanía de la juntura metalúrgica. En consecuencia, se forma una carga espacial negativa cerca del lado p de la juntura y una carga espacial positiva cerca del lado n . Esta zona de carga espacial (ZCE) crea un campo eléctrico que se dirige desde la carga positiva hacia la carga negativa. El campo eléctrico en la ZCE impone una fuerza de deriva sobre los portadores mayoritarios (electrones en el lado n y huecos en el lado p) en dirección opuesta a la de la difusión. Como resultado, se establece un equilibrio entre la fuerza de difusión que empuja los portadores hacia la juntura y la fuerza de deriva que los repele de la juntura.

En la Figura 1.11 se presenta la distribución del campo eléctrico, cabe destacar que este es no uniforme y el campo máximo se encuentra en la unión. Fuera de la ZCE se conserva la neutralidad de carga y el campo eléctrico es cero. El diagrama de bandas de la juntura p - n en equilibrio se muestra a la derecha de la Figura 1.11. Es importante resaltar que el nivel de Fermi se mantiene constante en todo el semiconductor, ya que un sistema en equilibrio térmico solo puede tener un nivel de Fermi [50]. En condiciones de equilibrio térmico la corriente total que circula por el semiconductor es nula.

El campo eléctrico en la región de transición provoca la curvatura de las bandas de valencia y conducción. La barrera de potencial creada por el campo eléctrico en la juntura se conoce como potencial de contacto, V_c , y queda definida por la Ec. 1.21.

$$V_c = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_n p_p}{n_i^2} \right) \quad (1.21)$$

Al aplicar una diferencia de potencial entre la zona p y la zona n , V_A , se modifica el ancho de la ZCE (W) y la barrera de potencial en la juntura como se muestra en la Figura 1.12. Si el potencial aplicado es mayor en la zona p que en la zona n , la juntura opera en polarización directa: disminuye la barrera de potencial y se favorece la corriente de difusión en el dispositivo. En caso contrario, con la polarización inversa, aumenta la barrera de potencial, disminuyendo la corriente de difusión por debajo de los valores de equilibrio, predominando una pequeña corriente en sentido negativo, producto del arrastre de los portadores.

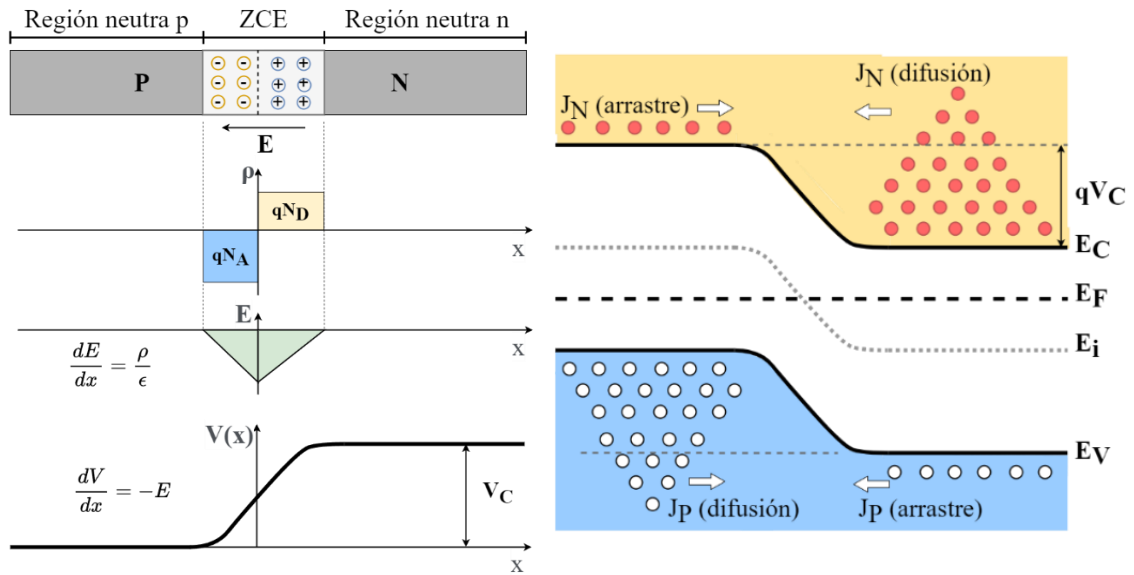


Figura 1.11. Juntura p-n en condiciones de equilibrio térmico. Izquierda: distribución de la carga espacial en la región de vaciamiento, distribución del campo eléctrico y potencial de contacto. Derecha: diagrama de bandas.

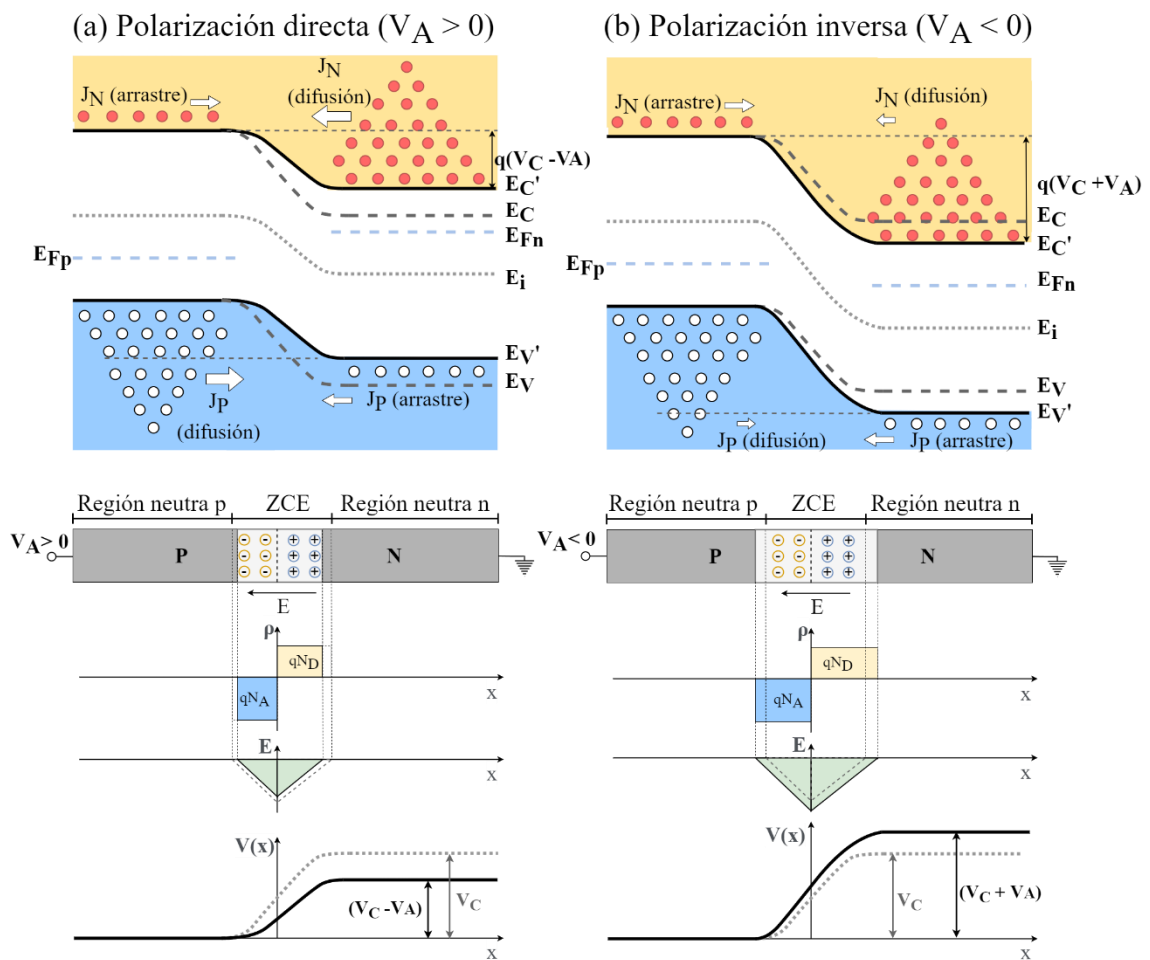


Figura 1.12. Juntura p-n. (a) Polarización directa. (b) Polarización inversa.

La densidad de corriente, J , que fluye por el dispositivo queda determinada por la Ec. 1.22, donde J_0 es la corriente de saturación dada por la Ec. 1.23. Donde L_N y L_P son la longitud de difusión de electrones y huecos, respectivamente. La Ec. 1.22 es conocida como la ecuación de Shockley, que describe el comportamiento ideal de una juntura p - n .

$$J(V_A) = J_0 \left[e^{(qV_A/kT)} - 1 \right] \quad (1.22)$$

$$J_0 = q n_i^2 \left(\frac{D_N}{L_N N_A} + \frac{D_P}{L_P N_D} \right) \quad (1.23)$$

Al iluminar el dispositivo con fotones que son absorbidos por el material, se generan pares electrón-hueco en el semiconductor. En el caso de los pares electrón hueco que son generados en la región de vaciamiento del fotodiodo, el campo eléctrico en la región de vaciamiento actúa para separar las cargas fotogeneradas, y una corriente eléctrica, llamada fotocorriente I_{Fot} , fluye en el circuito externo. Los huecos fotogenerados se desplazan en la región de vaciamiento, difunden hacia la región neutra p y luego se recombinan con los electrones que ingresan desde el electrodo negativo. De manera similar, los electrones fotogenerados se desplazan en la dirección opuesta.

Cuando una señal óptica penetra dentro de una distancia de una longitud de difusión fuera de la región de vaciamiento, los portadores fotogenerados difundirán hacia la región de vaciamiento y se desplazarán a través de la región de vaciamiento hacia el otro lado. Estas regiones neutras pueden considerarse como extensiones resistivas de los electrodos hacia la región de vaciamiento. La fotocorriente depende del número de pares electrón-hueco fotogenerados y de las velocidades de deriva de los portadores. Cabe señalar que la fotocorriente en el circuito externo se debe solo al flujo de electrones, aunque haya deriva de electrones y huecos en la región de vaciamiento. [48]

De esta forma aparece un término constante, independiente de la tensión, que es la densidad de corriente fotogenerada, J_{Fot} . Esta corriente establece una polarización en directa de la juntura por lo cual la corriente del diodo se puede considerar como una pérdida en el dispositivo y la ecuación de la densidad de corriente queda:

$$J(V_A) = J_0 \left[e^{(qV_A/kT)} - 1 \right] - J_{Fot} \quad (1.24)$$

Para una tasa de generación uniforme G , la densidad de corriente fotogenerada, J_{FOT} , se puede describir con la Ec. 1.25. Donde se considera que aportan a esta corriente todos los pares electrón-huecos fotogenerados dentro de la ZCE y hasta una distancia

de la ZCE igual a la longitud de difusión de los portadores minoritarios a cada lado de la juntura. [51]

$$J_{Fot} = qG(L_N + W + L_P) \quad (1.25)$$

1.3.2. Curva corriente - tensión y circuito equivalente

A partir de la Ec. 1.24 se puede trazar la curva característica de corriente vs. tensión, I-V, como se presenta en la Figura 1.13. Usualmente se utiliza esta curva en el primer cuadrante, cambiando el signo de la corriente. Para obtener la corriente del dispositivo se debe multiplicar la densidad de corriente por el área activa del dispositivo.

De la curva característica se resaltan los parámetros de tensión de circuito abierto (V_{CA}), cuando no circula corriente por el dispositivo, y la densidad de corriente de cortocircuito (J_{CC}), correspondiente a una tensión nula entre contactos.

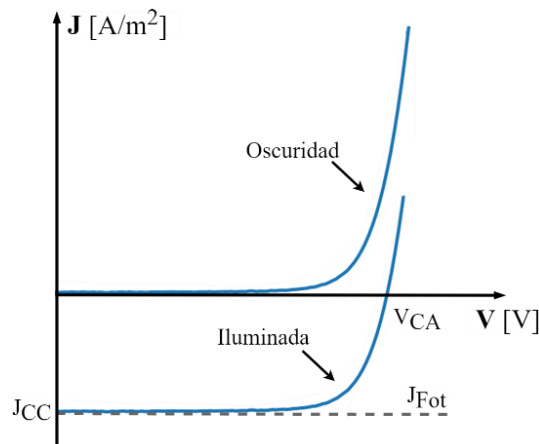


Figura 1.13. Curva característica J-V de la juntura p-n en condiciones de oscuridad e iluminación.

$$J_{CC} \cong J_{Fot} \quad (1.26)$$

$$V_{CA} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{Fot}}{J_0} + 1 \right) \quad (1.27)$$

Además, se puede obtener otra información de interés como la potencia máxima, P_{max} , que se puede extraer del dispositivo, que es un parámetro de interés para una celda solar, así como la eficiencia de conversión del dispositivo, η , definida en el punto de máxima potencia, donde P_i es la potencia de la radiación incidente. Por otro lado, el factor de forma es un parámetro que ofrece información de cuan alta es la potencia máxima P_{max} con respecto al tope ideal determinado por el producto entre V_{CA} e I_{CC} .

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_i} \quad (1.28)$$

$$FF = \frac{P_{MAX}}{V_{CA} * I_{CC}} \quad (1.29)$$

El modelo circuital más simple de la juntura $p-n$ considera el dispositivo como una fuente de corriente con un diodo en paralelo. A este circuito equivalente se le puede añadir una resistencia serie que contempla la resistencia de los contactos, la resistencia de contacto metal-semiconductor, y la resistencia del semiconductor. Por otra parte, se pueden modelar las pérdidas en la juntura en las zonas cercanas al borde de la celda, la presencia de defectos cristalinos y precipitado de impurezas en la zona de la juntura, con una resistencia paralela. El circuito equivalente se presenta en la Figura 1.14(a), donde también se añadió una resistencia de carga R_L . La curva I-V de la Figura 1.14(b), describe los diferentes puntos de operación (V_{OP} ; I_{OP}) del dispositivo bajo análisis.

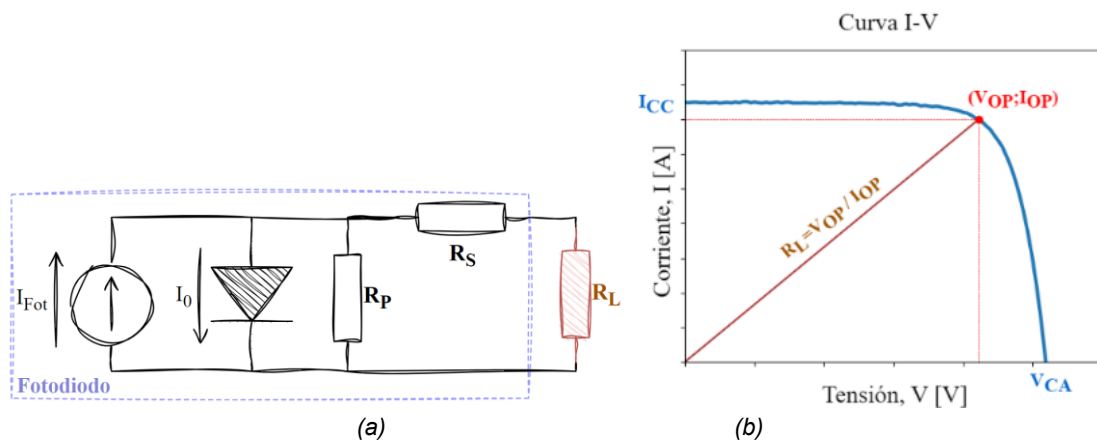


Figura 1.14. (a) Modelo circuital ideal de un fotodiodo, conectado a una carga R_L , [50].
(b) Curva característica corriente - tensión (I-V) en el primer cuadrante.

En el caso de estudio planteado en este trabajo, las junturas van a trabajar en condiciones cercanas a cortocircuito, donde la corriente es aproximadamente igual a la corriente fotogenerada. Las mediciones de las curvas I-V presentadas en esta Tesis Doctoral se realizaron mediante una carga electrónica e iluminación con simulador solar Clase C [52] en condiciones estándares de espectro solar extraterrestre AM0, 1367 W/m^2 de irradiancia [53].

1.3.3. Respuesta espectral

La eficiencia cuántica externa de un fotodiodo, EQE , es una medida del número de pares electrón huecos generados por cada fotón incidente:

$$EQE = \left(\frac{I_{Fot}}{q}\right) \left(\frac{P_{opt}}{hv}\right)^{-1} \quad (1.30)$$

Donde I_{Fot} es la fotocorriente producida por la absorción de la potencia óptica incidente (P_{opt}) a una longitud de onda λ . La longitud de onda de corte del fotodiodo, λ_C , está dada por la E_G del semiconductor, en el caso del Si es de aproximadamente $1,1 \mu\text{m}$. Para longitudes de onda mucho menores a λ_C , los fotones se absorben en la región cercana a la superficie donde se recombinan rápidamente antes de ser colectados en la región de vaciamiento de la juntura. La EQE siempre es menor a 1. [48]

Otro parámetro de interés es la respuesta espectral (RE), que se define como la corriente fotogenerada por potencia óptica incidente, cuyas unidades son A/W:

$$RE = \frac{I_{Fot}}{P_{opt}} \quad (1.31)$$

La RE se puede relacionar con la EQE mediante la Ec. 1.32.

$$RE = \frac{q\lambda}{hc} EQE \quad (1.32)$$

Si un fotodiodo tiene una EQE ideal del 100%, entonces la RE debería ser proporcional de manera lineal a la longitud de onda. En la práctica, la relación entre la RE y la λ se muestra en la Figura 1.15.

A partir de la EQE o la RE se puede determinar la densidad de corriente de cortocircuito del dispositivo. Determinar la J_{CC} por esta vía tiene la ventaja de que es independiente de la forma espectral de la fuente de luz utilizada, en contraste con la determinación de J_{CC} a través de una medición de curva I-V.

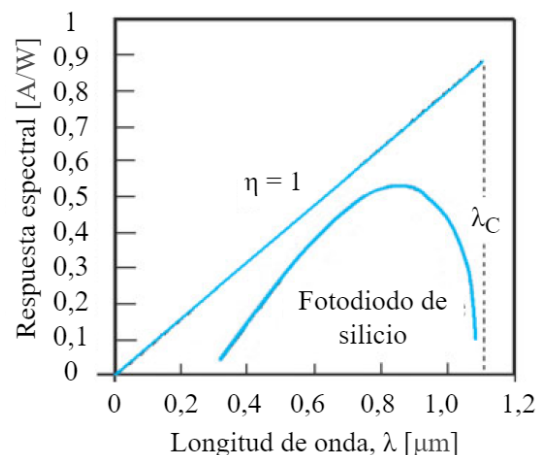


Figura 1.15. Respuesta espectral en función de la longitud de onda para un fotodiodo con $\eta = 1$ y para un fotodiodo típico comercial de silicio. [48]

La J_{CC} se obtiene al integrar en el rango de longitudes de onda de interés, la RE del dispositivo por la irradiancia espectral de la fuente de iluminación de interés, $S(\lambda)$, como se muestra en la Ec. 1.33.

$$J_{CC} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} RE(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (1.33)$$

Por ejemplo, para determinar la J_{CC} en condiciones de ambiente espacial, se utiliza el espectro solar AM0 [53]. En los dispositivos de Si, el límite de la respuesta espectral se encuentra en 1100 nm aproximadamente, dado que su E_G es de aproximadamente 1,1 eV.

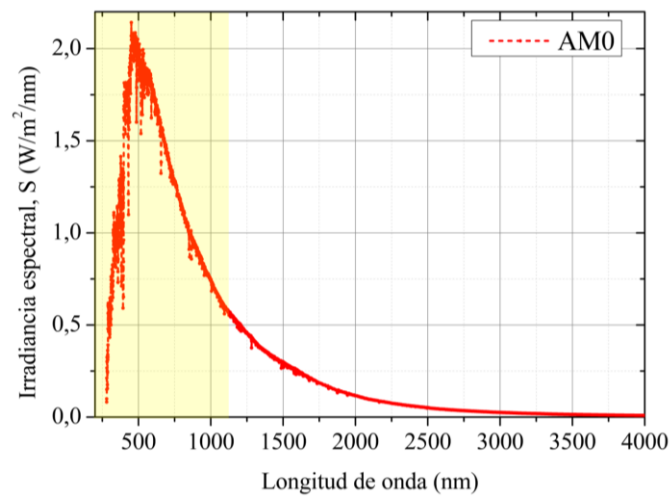


Figura 1.16. Irradiancia espectral solar extraterrestre, en condiciones AM0 [53], resaltado en amarillo el rango típico de respuesta del Si.

Las mediciones de respuesta espectral presentadas en esta Tesis se realizaron bajo normas IRAM [54] y ASTM [55] con un equipo desarrollado para tal fin en el DES [56].

Referencias

- [1] NASA, «State of the Art: Small Spacecraft Technology,» California, 2018.
- [2] T. Böhnke, M. Edoff y L. Stenmark, «Development of a MOEMS sun sensor for space applications,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 130, p. 28, 2006.
- [3] M. Macdonald y V. Badescu, *The International Handbook of Space Technology*, Springer, 2014.
- [4] V. L. Pisacane, *Fundamentals of space systems*, Oxford University Press, 2005.

- [5] W. Ley, K. Wittmann y W. Hallmann, Handbook of Space Technology, John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [6] J. R. Wertz, Spacecraft attitude determination and control, vol. 73, D. Reidel Publishing Company, 1978.
- [7] J. G. Webster y H. Eren, Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement., 2 ed., Taylor & Francis Group, 2014.
- [8] NASA, "Spacecraft sun sensors, NASA space vehicle design criteria /guidance and control/," 1970.
- [9] F. L. Markley y J. L. Crassidis, Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control, New York: Springer, 2014.
- [10] Bradford Space, «<https://www.bradford-space.com/products/css,>» [En línea]. [Último acceso: 09 10 2024].
- [11] Lens Research & Development, «<https://lens-rnd.com/products/-bison64-et-fm,>» [En línea]. [Último acceso: 10 2024].
- [12] F. K. Diriker, A. Frias, K. H. Keum y R. S. K. Lee, «Improved Accuracy of a Single-Slit Digital Sun Sensor Design for CubeSat Application Using Sub-Pixel Interpolation,» *Sensors*, vol. 21, nº 4, p. 1472, 2021.
- [13] M.-S. Wei, F. Xing, B. Li y Z. You, «Investigation of Digital Sun Sensor Technology with an N-Shaped Slit Mask,» *Sensors*, vol. 11, pp. 9764-9777, 2011.
- [14] M. Celebi y F. Gulmammadov, «Modeling and simulation activities for digital sun sensor development,» de *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference (AIAA, 2016)*, San Diego, California, USA, 2016.
- [15] A. Antonello, L. Olivieri y A. Francesconi, «Development of a Low-Cost Sun Sensor for Nanosatellites,» *Acta Astronautica*, vol. 144, p. 429–436, 2018.
- [16] H.-J. Kim, «A Sun-Tracking CMOS Image Sensor With Black-Sun Readout Scheme,» *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 68, nº 3, pp. 1115-1120, 2021.
- [17] M. Buonocore, M. Grassi y G. Rufino, «Aps-based miniature sun sensor for earth observation nanosatellites,» *Acta Astronautica*, vol. 56, nº 1-2, pp. 139-145, 2005.
- [18] N. Pereira, D. Bolsée, D. Sluse, A. Michel, M. Meftah, L. Damé y A. Irbah, «Design of an Optical Sun Sensor for a Space Application: a Reliable Passive Sun Tracking Device for the SOLAR/SOLSPEC Instrument.,» de *Optical Sensors 2017*, 2017.

- [19] E. Boslooper, N. v. d. Heiden, D. Naron, R. Schmits, J. J. v. d. Velde y J. v. Wakeren, «BepiColombo Fine Sun Sensor,» de *International Conference on Space Optics — ICSO 2012*, Ajaccio, Corse, 2012.
- [20] S. A. O’Keefe y H. Schaub, «Gyro accuracy and failure sensitivity of underdetermined Coarse Sun-Direction estimation,» de *AAS/AIAA Spaceflight Mechanics Meeting*, San Diego, CA, 2015.
- [21] W. Boyes, *Instrumentation Reference Book*, 2010.
- [22] C. Möller, R. Röder, T. Klein y T. Ortlepp, «ICP etched position sensitive silicon sensors on silicon,» *Journal of Instrumentation*, vol. 13, nº 05, 2018.
- [23] J. Romijn, S. Vollebregt, V. G. d. Bie, L. M. Middelburg, B. E. Mansouri, H. W. v. Zeijl, A. May, T. Erlbacher, J. Leijtens, G. Zhang y P. M. Sarro, «Microfabricated albedo insensitive sun position sensor system in silicon carbide with integrated 3D optics and CMOS electronics,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 354, p. 114268, 2023.
- [24] B. Yost y S. Weston, «State-of-the-art small spacecraft technology,» NASA NASA/TP-20240001462, 2024.
- [25] J. T. Wallmark, «A New Semiconductor Photocell Using Lateral Photoeffect,» de *Proceedings of the IRE*, 1957.
- [26] Hamamatsu Photonics,
«https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/psd_kpsd9001e.pdf,» [En línea].
- [27] I. Shafer, C. Powell, J. Stanton and D. Grieneisen, "CubeSat Solar Sensor Final Report," 2008.
- [28] C. d. Boom, J. Leijtens, L. v. Duivenbode y N. v. d. Heiden, «Micro Digital Sun Sensor: System in a Package,» de *Proceedings of the 2004 International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems (ICMENS’04)*, 2004.
- [29] C. Bolzi, M. Tamasi, M. Martínez Bogado y J. Plá, «Radiómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la CNEA: prototipo comercial,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 6, 2002.
- [30] C. G. Bolzi, J. C. Durán, O. Dursi, G. Renzini y H. Grossi Gallegos, «Construcción y ensayo de piranómetros fotovoltaicos de bajo costo desarrollados en la C.N.E.A.,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, vol. 3, 1999.

- [31] M. Martínez Bogado, M. Tamasi, C. Bolzi y D. Raggio, «Desarrollo de sensores solares en argentina, aplicaciones terrestres y espaciales,» *Revista Brasileira de Energia Solar*, vol. 6, nº 1, 2015.
- [32] M. Alurralde, M. Barrera, C. Bolzi, C. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J. D. Santo, J. Durán, D. F. Slezak, J. F. Vázquez, A. Filevich, C. Franciulli, J. García, E. Godfrin, L. González, V. Goldbeck, A. Iglesias y M. M. Bogado, «Development of solar arrays for Argentine satellite missions,» *Aerospace Science and Technology*, vol. 26, nº 1, pp. 38-52, 2013.
- [33] M. Alurralde, C. Bolzi, J. DiSanto, J. F. Vázquez, J. García, L. González, M. L. Ibarra, M. M. Bogado, S. Muñoz, J. Olima, J. Pérez, D. Raggio, O. Romanelli, C. Rinaldi, H. Socolovsky y M. Tamasi, «Technological Facilities for Development, Fabrication, Integration and Testing of Solar Arrays for Space Applications,» de *Proceedings of the 31st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Utah, EEUU, 2017.
- [34] C. G. Bolzi, M. Martínez Bogado y M. J. L. Tamasi, «Reseña del desarrollo de sensores solares en CNEA para misiones satelitales,» *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 31, nº 2684-0073, pp. 29-36, 2013.
- [35] M. J. Tamasi, «Celdas Solares para Uso Espacial: Optimización de Procesos y Caracterización,» Tesis para optar al título de Doctor en Ciencia y Tecnología - Mención Física del Instituto Sábato, 2003.
- [36] C. Bolzi, C. Bruno, J. Durán, E. Godfrin, M. Martínez Bogado, L. Merino, J. Plá, M. Tamasi y M. Barrera, «First experiment of Argentine solar cells in space: modules fabrication, characterisation, and telemetry data analysis from SAC-A satellite,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 73, nº 3, pp. 269-280, 2002.
- [37] M. Díaz Salazar, N. Kondratiuk, A. Moreno, M. Martínez Bogado, M. Tamasi y J. Di Santo, «Caracterización angular automatizada de sensores solares fotovoltaicos,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 22, 2018.
- [38] A. Moreno, M. Tamasi, M. Martínez Bogado, M. Díaz Salazar y N. Kondratiuk, «Comparación de la respuesta angular de un sensor grueso de posición para uso satelital con un sensor comercial,» de *XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES)*, La Plata, 2016.
- [39] M. J. L. Tamasi, M. G. M. Bogado, S. E. Rodríguez, I. Prario, H. P. Socolovsky, J. C. Plá, M. A. Alurralde, C. Nigri y A. Filevich, «Diseño, fabricación, caracterización

y ensayos de sensores fotovoltaicos para la misión satelital Aquarius-SAC-D,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 11, 2007.

- [40] NASA, «<https://aquarius.nasa.gov/>,» [En línea].
- [41] CONAE, «<https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/misiones-espaciales/sacom>,» [En línea].
- [42] C. Bolzi, P. Cabot, E. Carella, J. D. Santo, J. Durán, E. G. J. Fernández Vázquez, V. Goldbeck, L. González, M. G. M. Bogado, A. Moglioni, S. Muñoz, S. Nigro, J. Olima, J. Pérez, J. Plá, D. Raggio, Rinaldi, Romanelli, H. Socolovsky y M. Tamasi, «Paneles solares de la misión satelital SAOCOM 1A: integración y ensayos,» *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 40, 2017.
- [43] INPE, «http://www.inpe.br/amazonia1/en/about_satellite/,» [En línea].
- [44] CONAE, «<https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/misiones-espaciales/sabiamar>,» [En línea].
- [45] J. Leijtens, D. Broekmans y F. Stelwagen, «Digital Sun sensors, where there is no ease in adding ten degrees,» de *International Conference on Space Optics—ICSO 2020*, 2021.
- [46] J. Gröbner y N. Kouremeti, «The Precision Solar Spectroradiometer (PSR) for direct solar irradiance measurements,» *Solar Energy*, vol. 185, pp. 199-210, 2019.
- [47] L. A. Bastida, F. Barral, M. Videla, E. Sambrano y J. Plá, «Prototipo de concentrador solar para aplicaciones en CPV: Primeros desarrollos en el seguidor de dos ejes y el sistema óptico,» *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente - AVERMA*, vol. 26, p. 249–261, 2022.
- [48] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [49] R. F. Pierret, *Semiconductor Device Fundamentals*, Addison-Wesley Publishing Company, 1996.
- [50] M. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*, Prentice-Hall, 1982.
- [51] A. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R. v. Swaaij y M. Zeman, *Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*, UIT Cambridge, 2016.
- [52] ASTM E927-19, «Standard Specification for Solar Simulation for Photovoltaic Testing,» ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [53] ASTM E490-22, «Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Table,» ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022.

- [54] IRAM 210013-12, «Energía solar. Módulos fotovoltaicos. Parte 12 - Métodos de ensayo de la respuesta espectral de celdas fotovoltaicas.,» Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, 2012.
- [55] ASTM E1021-15, «Standard Test Methods for Measuring the Spectral Response of Photovoltaic Cells,» ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [56] H. Socolovsky, J. García y J. Plá, «Setup development for spectral response measurement on multijunction solar cells,» de *Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Valencia, Spain, 2010.

Capítulo 2

Diseño y simulación de sensores solares finos

El diseño del dispositivo va a determinar sus características; si este puede determinar la posición del satélite con respecto al Sol en uno o dos ejes, el campo de visión, la sensibilidad y la linealidad de la respuesta del sensor. En este capítulo, se describe el proceso de diseño de sensores solares finos basados en arreglos de fotodiodos. Se proponen diferentes configuraciones, en uno y dos ejes, con el objetivo de obtener un diseño que ofrezca las mejores prestaciones y que se adecue a las capacidades tecnológicas de fabricación existentes en CNEA.

2.1. Diseño general de los sensores finos

Para determinar la posición del satélite con respecto al Sol con mayor precisión que los CSS previamente elaborados en CNEA, se propone modificar el principio de operación del sensor. En lugar de utilizar la respuesta al coseno de un fotodiodo, se plantea comparar las áreas iluminadas en diferentes fotodiodos. La premisa que se considera con este enfoque es que una mayor sensibilidad en la respuesta del sensor se traduce en una mayor precisión al medir la posición con respecto al Sol. Con este objetivo se planteó el diseño de un detector con al menos dos fotodiodos y se añadió al diseño un componente óptico que cumple la función de definir el área iluminada en cada fotodiodo. Por otro lado, se consideraron alternativas de diseño del detector donde la separación entre los fotodiodos no sea una limitante de la respuesta del sensor.

El diseño de sensor solar propuesto consiste en un detector sensible a la radiación solar y una componente óptica que limita y direcciona la luz que llega al detector. Para limitar y direccionar la luz se utiliza una ventana separada a una distancia conocida del detector. La ventana propuesta es una apertura en una capa delgada metálica,

depositada en un sustrato de vidrio, cuyo espesor se diseñó de aproximadamente 500 nm. El metal utilizado debe tener buena adherencia al vidrio, como es el caso del cromo. La separación entre la ventana y el detector queda definida por el espesor del vidrio.

El diseño general del detector propuesto es un arreglo de fotodiodos. Con el objetivo de garantizar la planitud del detector se propone que el arreglo de fotodiodos esté integrado en un sustrato de silicio cristalino. Los fotodiodos están formados por junturas tipo $n^+/p/p^+$, tomando como referencia la experiencia del DES en la elaboración de celdas solares [1]. Para obtener las zonas n^+ de forma localizada se utiliza una barrera de SiO_2 , como se observa en la Figura 2.1, donde se presenta la sección transversal de un arreglo de dos fotodiodos. Los detectores diseñados se limitan a un cuadrado de 12 mm de lado, tomando como referencia el tamaño de los CSS elaborados en el DES [2].

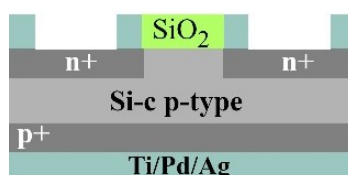


Figura 2.1. Sección transversal de un detector formado por un arreglo de dos fotodiodos.

El principio de funcionamiento de un fotodiodo es que su corriente de cortocircuito (I_{CC}) es proporcional al área iluminada, a su densidad de corriente de cortocircuito (J_{CC}) y al coseno del ángulo de incidencia (ϑ_i) de la radiación directa al dispositivo, Ec. 2.1. El factor $\cos(\vartheta_i)$ expresa que el área iluminada no es la propiedad relevante, sino su proyección en el plano normal a la dirección de la radiación incidente, esto se conoce como la ley del coseno de Lambert [3].

$$I_{CC} = J_{CC} * A_{iluminada} * \cos(\vartheta_i) \quad (2.1)$$

Los sensores propuestos miden la posición satélite con respecto al Sol a partir del análisis del área iluminada en cada fotodiodo del detector, la cual queda definida principalmente por la geometría de la ventana y los fotodiodos.

Para determinar la posición con respecto al Sol en función del ángulo de incidencia de la radiación solar es necesario parametrizar dicha posición. Se utiliza una esfera celeste de radio arbitrario con el sensor en su centro (Figura 2.2) para describir la posición del astro con respecto al sensor. En este sistema de referencia centrado en el sensor, el plano fundamental es el plano del sensor. De esta forma, se puede parametrizar la posición del Sol en función de los ángulos azimutal y cenital. La altitud es la elevación angular del centro del disco solar sobre el plano del sensor, mientras que el ángulo

azimutal (φ) corresponde al ángulo de la línea de visión proyectada en el plano del sensor medido en sentido horario. El ángulo cenital se corresponde con el ángulo entre el Sol y la normal del plano del sensor, este es el ángulo de incidencia (ϑ_i) que se definió en la Ec. 2.1. En esta representación, la posición del Sol está definida entre 0 y 90° del ángulo cenital y entre 0 y 360° del azimutal.

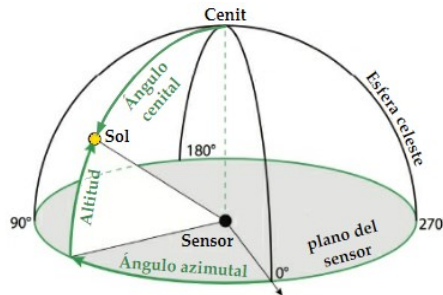


Figura 2.2. Representación del movimiento del Sol en el sistema de referencia del sensor.

La configuración general del diseño de los sensores propuestos se presenta en la Figura 2.3. Los sensores están conformados por una ventana que limita y direcciona la luz, un vidrio de espesor h y el detector. Para analizar el área iluminada en los fotodiodos del detector se define la posición del centro del haz de luz ($L_x; L_y$) en el plano del detector con respecto a la posición cuando el ángulo de incidencia es 0° como se muestra en la Figura 2.3.

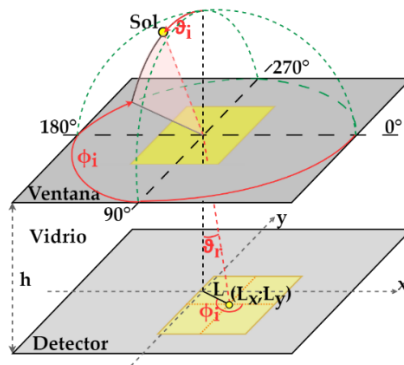


Figura 2.3. Configuración general de un sensor solar de posición y parametrización de la posición del Sol en el plano del detector.

Para parametrizar la posición del centro del haz de luz que llega al detector hay que considerar la Ley de Snell, Ec. 2.2 porque la luz atraviesa diferentes medios. En la Ec. 3.2, n_1 y n_2 son los índices de refracción del aire y del vidrio respectivamente, y ϑ_r es el ángulo de refracción de la luz en el vidrio.

$$n_1 * \text{sen}(\vartheta_i) = n_2 * \text{sen}(\vartheta_r) \quad (2.2)$$

La distancia del centro del haz al centro del plano del detector (L en la Figura 2.3) se define en la Ec. 2.3, despreciando la separación entre el vidrio y el detector. Las coordenadas L_x y L_y se relacionan con el ángulo cenital refractado (ϑ_r) y el ángulo azimutal (φ), según las Ec. 2.4 y 2.5.

$$L = h * \tan \vartheta_r \quad (2.3)$$

$$L_x = -L * \cos \varphi \quad (2.4)$$

$$L_y = L * \sen \varphi \quad (2.5)$$

Debido a la naturaleza experimental del proceso de elaboración e integración de los sensores elaborados en el DES, es necesario considerar en el modelado de los dispositivos que en el sensor pueden existir errores de alineación entre el centro del detector y el centro de la ventana. De existir error de alineación, el sistema de referencia centrado en la ventana no va a coincidir con el sistema de referencia centrado en el detector como se muestra en la Figura 2.4, y hay que corregir las coordenadas L_x y L_y mediante las Ec. 2.6 y 2.7.

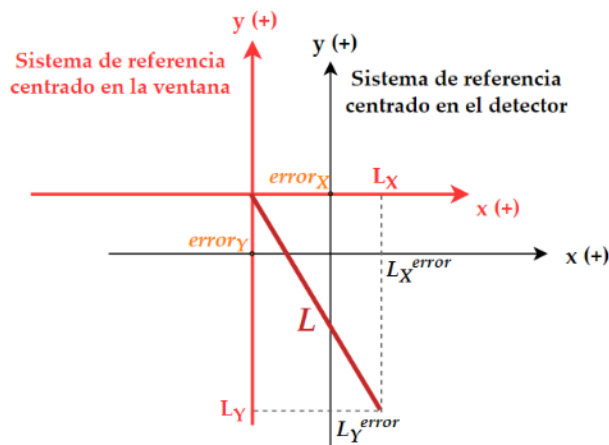


Figura 2.4: Corrección de la posición del centro del haz de luz al considerar el error de alineación entre la ventana y el detector.

$$L_x^{error} = L_x - error_x \quad (2.6)$$

$$L_y^{error} = L_{SRventana}^y - error_y \quad (2.7)$$

El campo de visión del sensor (FOV) se define como el máximo ángulo incidente capaz de detectar el sensor:

$$FOV = \vartheta_i^{MAX} \quad (2.8)$$

El ángulo de incidencia máximo se obtiene cuando L toma su valor máximo, lo cual se corresponde con el límite de la detección de la posición del Sol y está sujeta a la

configuración del sensor y se analiza para cada diseño en particular. De las Ec. 2.3 y 2.8 se puede inferir que el FOV del sensor será inversamente proporcional a la altura del vidrio. Si bien en el modelado de los sensores no se está teniendo en cuenta el encapsulado del sensor, su diseño se debe considerar al determinar el FOV efectivo del sensor.

La sensibilidad del sensor brinda información de cómo los cambios en la señal de entrada afectan la salida del sensor. En el caso de una respuesta lineal, la sensibilidad se corresponde con la pendiente de la respuesta de salida. Analizando la Ec. 2.3, se deduce que el uso de un vidrio más grueso resultará en mayores variaciones de la posición del centro del haz para variaciones de ϑ y por tanto una mayor sensibilidad en la respuesta del sensor.

En las siguientes secciones se presenta el diseño, modelado y simulación de diferentes propuestas de sensor solar de posición con la estructura de la Figura 2.3. Se definieron diferentes configuraciones y geometrías tanto para el detector como para la ventana, se analizaron posibles variantes a partir de la cantidad y separación de los fotodiodos en el detector.

Para simular la respuesta de los diferentes diseños, se desarrolló un programa en Python basado en los diferentes modelos propuestos. El diagrama de flujo del programa se presenta en la Figura 2.5.

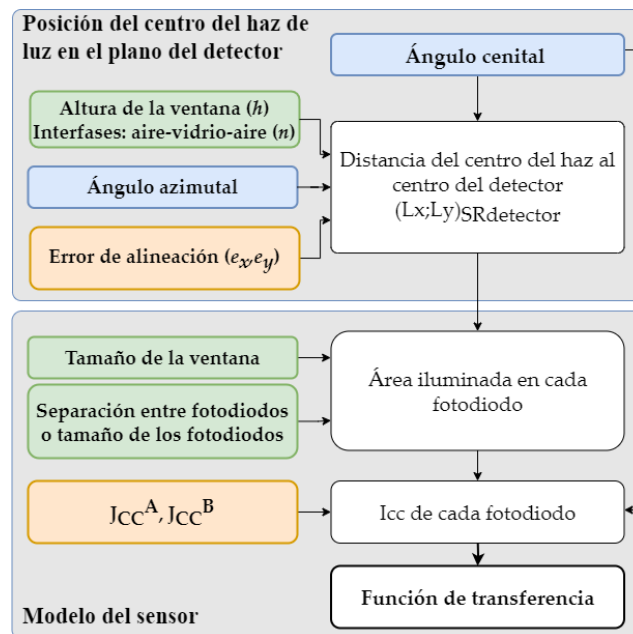


Figura 2.5. Diagrama de flujo del programa desarrollado para simular la respuesta de los diferentes diseños.

En el diagrama, las variables de entrada que definen la posición del Sol están resaltadas en azul, los parámetros definidos en el diseño están resaltados en verde y en naranja los parámetros de fabricación que influyen en la corriente de cada fotodiodo. La primera parte del programa modela la posición del centro del haz de luz en el plano del detector a partir del ángulo cenital y azimutal del Sol, teniendo en cuenta los parámetros definidos en el diseño (recuadros verdes). La segunda parte del programa calcula el área iluminada en cada fotodiodo del detector según el modelo específico de cada configuración. En la simulación, se agregaron como entradas al modelo las posibles diferencias en la J_{CC} de los fotodiodos y los posibles errores de alineación entre las ventanas y el detector.

Para evaluar los modelos, se realizaron simulaciones variando la altura y el tamaño de las ventanas, así como el tamaño de los fotodiodos del detector. Para la simulación de la I_{CC} se tomó como referencia el comportamiento eléctrico de los CSS elaborados en el DES, debido al gran número de mediciones disponibles, y se consideró una J_{CC} de aproximadamente 35 mA/cm^2 para una masa de aire extraterrestre AM0 (para una irradiancia solar a tope de atmósfera de 1367 W/m^2). A partir de los resultados de las simulaciones de cada diseño, se analiza su FOV, linealidad y sensibilidad, para lo cual se utiliza la regresión lineal de la función de transferencia. A partir de las simulaciones de las diferentes configuraciones se analizaron sus ventajas y desventajas.

Los parámetros específicos de fabricación, como la separación entre fotodiodos, el ancho de los contactos y el área total del detector de los sensores, se determinaron en función de la experiencia en la fabricación de los CSS y la tecnología disponible en CNEA, en el Laboratorio Fotovoltaico del DES y en la Sala Limpia del Departamento de Micro y Nanotecnología (DMNT) de CNEA. Otros parámetros de fabricación, como el área activa de los fotodiodos, el tamaño de la ventana y el grosor del vidrio, se definen en función de los resultados de la simulación.

2.2. Sensores solares finos de un eje

En el sensor solar de posición de un eje el área iluminada en cada fotodiodo dependerá solamente de las variaciones de la posición del centro del haz de luz en un eje del plano del detector (L_x). Con este principio no es posible determinar los ángulos cenital y azimutal del Sol con un único sensor. Para tener una representación completa de la posición del Sol es necesario utilizar dos sensores de un eje, con sus ejes de medición orientados perpendicularmente.

Para la medición de la posición del Sol en un eje se diseñaron dos propuestas de sensor. En ambos casos, el detector está compuesto por dos fotodiodos integrados en un sustrato de silicio. La respuesta del sensor se obtiene al comparar el área iluminada en cada fotodiodo. La principal diferencia entre ellos radica en cómo se logra que el área iluminada en cada fotodiodo varíe en función del ángulo de la radiación incidente. La primera propuesta utiliza un detector de dos cuadrantes y la segunda utiliza un fotodiodo triangular.

2.2.1. Diseño del sensor con detector de dos cuadrantes

En este primer diseño, el detector está formado por dos fotodiodos semicirculares que forman dos cuadrantes. Para este diseño, se debe considerar que el área activa de cada fotodiodo excede el área de la ventana. El área iluminada en cada fotodiodo queda definida por la altura y la geometría de la ventana e independiente del tamaño de los fotodiodos (Figura 2.6). La separación entre fotodiodos está alineada con el eje y del plano del detector, de forma tal que el sensor solo detecte variaciones en la componente x de la posición del centro del rayo de luz, L_x .

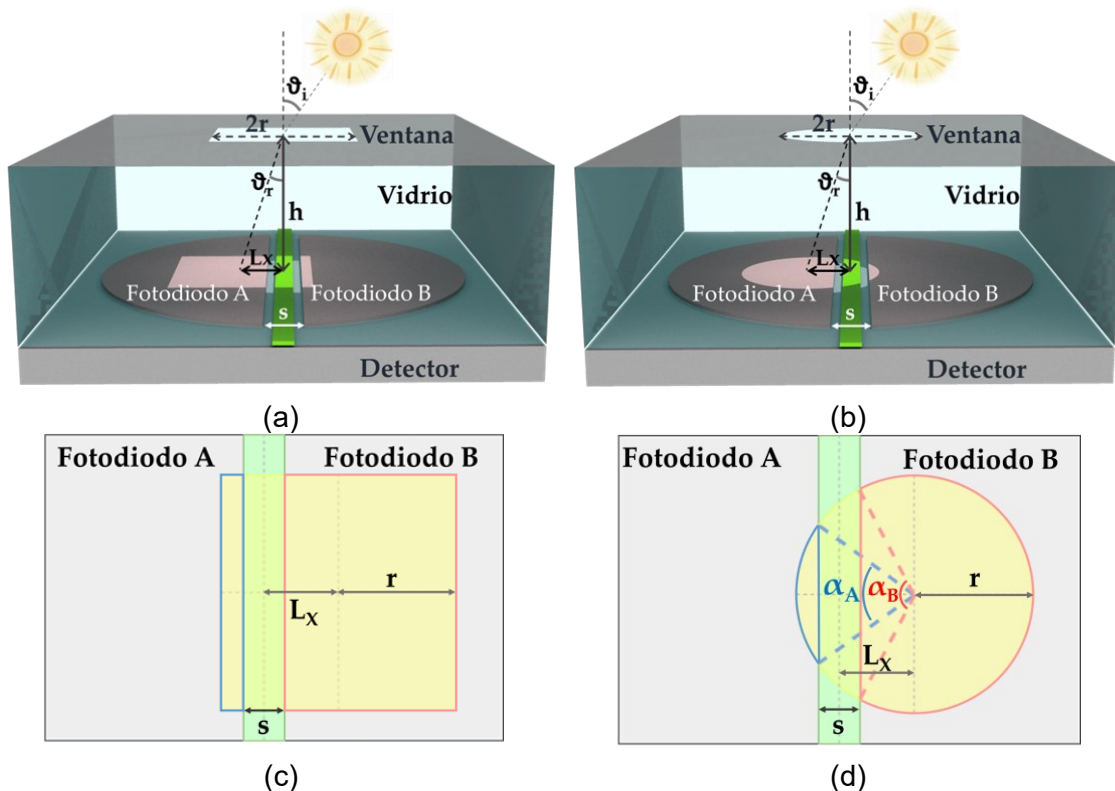


Figura 2.6. Vista en perspectiva y superior del sensor de un eje diseñado con un detector de dos cuadrantes, con una ventana cuadrada (a) y (c), y con ventana circular (b) y (d).

Se presenta el análisis de la respuesta del sensor al utilizar una ventana con geometría cuadrada o circular, como se observa en la Figura 2.6(a) y (c) respectivamente. Además, se presenta un análisis de la variación de la respuesta del sensor con la variación de la altura de la ventana.

Como se observa en el diseño del sensor presentado en la Figura 2.6, las áreas activas de los fotodiodos se encuentran separadas una distancia s , definida por el ancho de los contactos y de la barrera de SiO_2 , que se utiliza para elaborar de forma localizada los fotodiodos. La sección transversal de ambas geometrías de la ventana tiene un ancho $2r$ y el centro de la ventana se encuentra alineado con el punto medio entre los fotodiodos. De forma tal que cuando ϑ_i es 0° , el área iluminada es igual en ambos fotodiodos, y cuando ϑ_i aumenta en $\varphi = 0^\circ$, el área iluminada en el fotodiodo A aumenta mientras que en B disminuye.

El límite en la detección de la posición del Sol con esta configuración está dado por el ángulo para el cual uno de los fotodiodos deja de estar iluminado, lo que se corresponde con L_x^{MAX} y queda definido por la Ec. 2.9. Es importante señalar que, en este diseño, el FOV puede estar limitado por la separación entre los fotodiodos, por lo que es deseable minimizar esta separación. En esta configuración del detector, el tamaño y la geometría del fotodiodo deben elegirse para garantizar que, en L_x^{MAX} , la luz no alcance el borde del fotodiodo.

$$L_x^{max}{}_{2c} = r - \frac{s}{2} \quad (2.9)$$

Si se utiliza una ventana cuadrada de lado $2r$, Figura 2.6 (c), el área iluminada en cada fotodiodo en función del ángulo de la radiación incidente es un rectángulo de área definida por las Ec 2.10 y 2.11.

$$A_B = 2r * \left(r + L_x - \frac{s}{2} \right) \quad (2.10)$$

$$A_A = 4r^2 - 2r * \left(r + L_x + \frac{s}{2} \right) \quad (2.11)$$

Al utilizar una ventana circular, el área iluminada en cada fotodiodo es la porción del círculo entre la cuerda definida por el borde del fotodiodo y el arco correspondiente. El área iluminada en el fotodiodo A se puede modelar como el área del segmento circular definido por el ángulo central α_A , como se expresa en la Ec. (2.12, mientras que en el fotodiodo B, se puede describir como el área total de la ventana menos el segmento circular definido por α_B , como se muestra en la Ec. 2.13. Los ángulos centrales α_A y α_B

se obtienen a partir de las Ec. 2.14 y 2.15, considerando la distancia desde el centro del círculo hasta la cuerda.

$$A_{seg}^A = \frac{1}{2} * r^2 * (\alpha_A - \text{sen } \alpha_A) \quad (2.12)$$

$$A_{seg}^B = \pi * r^2 - \frac{1}{2} * r^2 * (\alpha_B - \text{sen } \alpha_B) \quad (2.13)$$

$$\alpha_A = 2 * \arccos\left(\frac{L_x + \frac{s}{2}}{r}\right) \quad (2.14)$$

$$\alpha_B = 2 * \arccos\left(\frac{L_x - \frac{s}{2}}{r}\right) \quad (2.15)$$

Como se ha mencionado, la respuesta del sensor se obtiene al comparar el área iluminada en cada fotodiodo y con ese objetivo, se plantea analizar la diferencia entre la I_{CC} de cada fotodiodo que, según la Ec. 2.1, no solo depende del área iluminada. Para obtener una función de transferencia del sensor con detector de dos cuadrantes (H_{2C}) que dependa únicamente del área iluminada en cada fotodiodo, se propone normalizar la diferencia entre las I_{CC} con la suma de las I_{CC} (Ec. 2.16). De esta forma, se simplifican los parámetros que afectan en igual medida a la I_{CC} , como son el coseno del ángulo de la radiación incidente y la J_{CC} , que se puede suponer igual para ambos fotodiodos.

$$H_{2C} = \frac{I_{CC}^A - I_{CC}^B}{I_{CC}^A + I_{CC}^B} = \frac{A_{iluminada}^A - A_{iluminada}^B}{A_{iluminada}^A + A_{iluminada}^B} \quad (2.16)$$

Al utilizar una ventana cuadrada, se sustituyen las Ec. 2.10 y 2.11 en la Ec. 2.16 y se obtiene una función de transferencia en función de la posición del centro del haz de luz L_x , Ec. 2.17, que al combinarla con las Ec. 2.2 a 2.4, resulta en una función de transferencia que depende del ángulo de la radiación incidente, Ec. 2.18. Al utilizar la ventana circular de radio r , la función de transferencia en función de la posición del centro del haz de luz se obtiene al reemplazar las Ec. (2.12 a 2.15 en la Ec. 2.16 y se obtiene la Ec. 2.19.

$$H_{\blacksquare}(L_x) = \frac{-L_x}{r - \frac{s}{2}} \quad (2.17)$$

$$H_{\blacksquare}(\vartheta_i, \varphi) = \frac{h * \tan\left(\arcsen\left(\frac{n_1}{n_2} \text{sen } \vartheta_i\right)\right) * \cos \varphi}{r - \frac{s}{2}} \quad (2.18)$$

$$H_{\bullet}(L_x) = \frac{2\cos\left(\frac{L_x + \frac{s}{2}}{r}\right) - \sin\left(2\cos\left(\frac{L_x + \frac{s}{2}}{r}\right)\right) - 2\pi + 2\cos\left(\frac{L_x - \frac{s}{2}}{r}\right) - \sin\left(2\cos\left(\frac{L_x - \frac{s}{2}}{r}\right)\right)}{2\cos\left(\frac{L_x + \frac{s}{2}}{r}\right) - \sin\left(2\cos\left(\frac{L_x + \frac{s}{2}}{r}\right)\right) + 2\pi - 2\cos\left(\frac{L_x - \frac{s}{2}}{r}\right) + \sin\left(2\cos\left(\frac{L_x - \frac{s}{2}}{r}\right)\right)} \quad (2.19)$$

2.2.2. Simulación del sensor con detector de dos cuadrantes

Los diseños se simularon para evaluar cómo los diferentes parámetros influyen en el comportamiento del sensor. Para simular los distintos diseños de un sensor de un solo eje con un detector de dos cuadrantes, se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones de diseño:

- a) Separación entre las áreas activas de los fotodiodos (s): Esta separación se define en función de los requisitos de los procesos tecnológicos que se emplean en la elaboración del detector. Se definió un contacto eléctrico de 100 μm de ancho y 1 μm de altura, basado en la experiencia previa con los contactos de los CSS. Para separar los fotodiodos, se diseñó una barrera de SiO_2 de 150 μm de ancho, tomando como referencia la longitud típica de difusión de los portadores minoritarios en un fotodiodo de silicio [4, 5]. De esta forma, la separación total entre las áreas activas se diseñó de 350 μm ($s = 350 \mu\text{m}$).
- b) Espesor del sustrato de vidrio de la ventana: Solo se consideraron ciertos espesores debido a la disponibilidad de sustratos de vidrio. En particular, en el laboratorio se contaba con sustratos de 1 y 2 mm de espesor, además se evaluaron obleas de vidrio comerciales de 300 y 700 μm de espesor.

A partir de los criterios definidos se planificaron tres experimentos: 1) simular la respuesta del área iluminada en función de la altura de la ventana para un tamaño dado de la ventana; 2) simular la respuesta del área iluminada, la I_{CC} y la función de transferencia en función del tamaño de la ventana para un espesor de vidrio fijo; y 3) analizar la respuesta del sensor de dos cuadrantes al variar los ángulos cenital y azimutal del Sol. Como el sensor solo detecta variaciones en L_x , los dos primeros análisis se simplificaron asumiendo que L_y es 0, lo cual ocurre cuando el ángulo azimutal toma valores de 0 o 180°.

El impacto de estas variaciones en la sensibilidad y linealidad de la respuesta se evalúa mediante regresiones lineales de la función de transferencia entre 0° y 45°. La pendiente de la línea se analiza como la sensibilidad de salida, y el valor R^2 se utiliza para evaluar la linealidad. En los gráficos, los resultados de las regresiones lineales de la función de transferencia se representan con líneas discontinuas grises.

En la Figura 2.7 se muestran los resultados de la simulación del área iluminada de cada fotodiodo y la función de transferencia del sensor en función de la altura de la ventana, al variar el ángulo cenital del Sol con un ángulo azimutal de 0° . Se analizaron cuatro espesores del vidrio: 300 μm , 700 μm , 1 mm y 2 mm. Para la simulación se consideró una ventana cuadrada de 2 mm de lado y una ventana circular de 2 mm de diámetro.

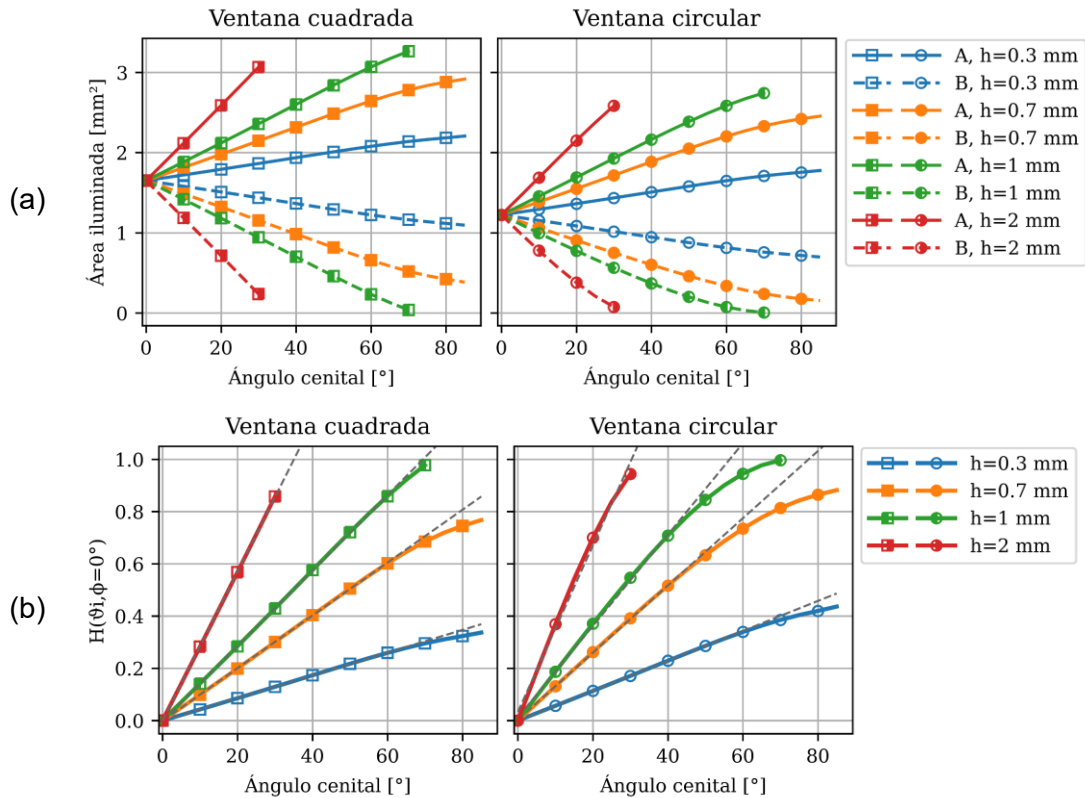


Figura 2.7. Simulaciones variando la altura de la ventana, h , con $r = 1 \text{ mm}$ en $\phi = 0^\circ$, con ventana cuadrada (izquierda) y ventana circular (derecha). (a) Área iluminada en cada fotodiodo. (b) Función de transferencia $H_{2C}(\theta, \phi = 0^\circ)$.

En los gráficos de la Figura 2.7(a) se verifica el comportamiento esperado del sensor, siguiendo el sistema de referencia en la Figura 2.3 para la posición del centro del punto de luz en el plano del detector y los diseños en la Figura 2.6. Se evidencia que cuando el ángulo cenital es 0° , el área iluminada es igual en ambos fotodiodos. Al aumentar ángulo cenital, el área iluminada del fotodiodo B disminuye, mientras que aumenta en el fotodiodo A.

Los resultados de la simulación, Figura 2.7(b), indican que la sensibilidad mejora al utilizar vidrios más gruesos, aunque a expensas de un FOV más reducido. Para la ventana cuadrada, la sensibilidad de la función de transferencia derivada de las regresiones lineales aumenta de $4,3 \times 10^{-3}$ a $2,86 \times 10^{-2} \text{ 1}^\circ$. De manera similar, para la ventana circular, la sensibilidad aumenta de $5,7 \times 10^{-3}$ a $3,19 \times 10^{-2} \text{ 1}^\circ$.

De la simulación de la función de transferencia se concluye que, para ambas geometrías de la ventana, con un vidrio de 2 mm se obtiene la mejor sensibilidad, pero a expensas de un FOV de 30°, mientras que con el vidrio de 1 mm de espesor se obtiene un FOV mayor a 60° con mejor sensibilidad que con los vidrios de 300 y 700 μm . Los valores de R^2 , de la linealización entre 0 y 45° de la función de transferencia con la ventana cuadrada, son cercanos a 1 y con la ventana circular son mejores que 0,99.

En la Figura 2.8 se muestran los resultados de la simulación del área iluminada en cada fotodiodo y la función de transferencia al variar el tamaño de la ventana, en función del ángulo cenital del Sol con un ángulo azimutal de 0°. La simulación se realizó para ventanas cuadrada y circular de 1, 2 y 3 mm de lado y diámetro, respectivamente, y con un vidrio de espesor 1 mm. Del análisis de las simulaciones se concluye que el tamaño de la ventana puede limitar el FOV cuando este se aproxima a la separación entre los fotodiodos (350 μm). Además, se observa en la Figura 2.8(a) que, al modificar el tamaño de la ventana, se modifica el rango de valores del área iluminada en cada fotodiodo, lo que implica una variación en el rango de I_{CC} .

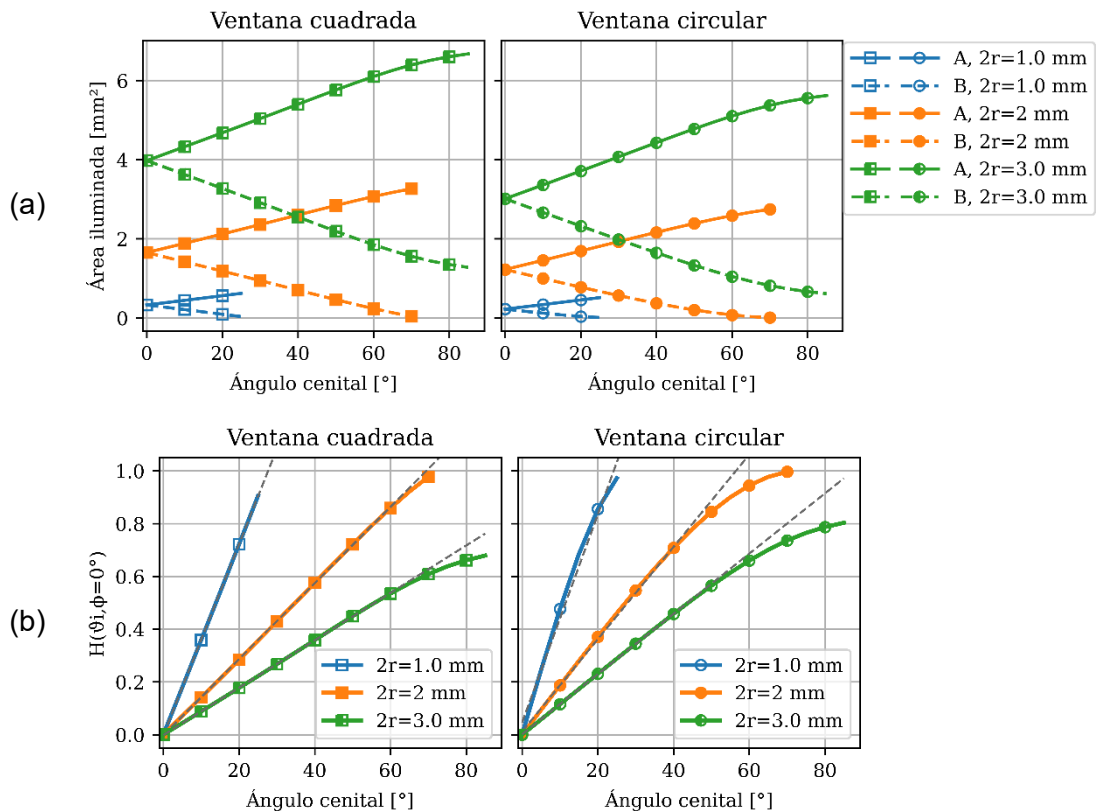


Figura 2.8. Simulaciones del sensor de un eje con detector de dos cuadrantes, variando el ancho de la ventana, $2r$, con ventanas cuadrada (izquierda) y circular (derecha) de 1 mm de espesor. (a) Área iluminada en cada fotodiodo. (b) Función de transferencia $H_{2C}(\theta, \varphi = 0^\circ)$.

Al simular la función de transferencia bajo las mismas condiciones, Figura 2.8(b), se observa que el tamaño de la ventana afecta la sensibilidad de la medición, ventanas más pequeñas proporcionan una mejor sensibilidad. En particular, con ventanas cuadradas, la sensibilidad calculada a partir de las regresiones lineales de la función de transferencia aumenta de $9,0 \times 10^{-3}$ a $3,6 \times 10^{-2} \text{ 1/}^\circ$. De forma similar, con ventanas circulares, la sensibilidad aumenta de $1,1 \times 10^{-2}$ a $3,9 \times 10^{-2} \text{ 1/}^\circ$. Además, se observa que la función de transferencia del sensor con la ventana cuadrada es lineal en un mayor rango en comparación a la circular. A partir de las regresiones lineales realizadas entre 0 a 45° , se obtuvo que el valor de R^2 de la linealización de la función de transferencia para la ventana cuadrada es cercano a 1 y que con la ventana circular de $2r = 2 \text{ mm}$, R^2 es 0,998. En la Figura 2.8(b), se observa que el modelo para la ventana circular cuando $2r = 2 \text{ mm}$ se desvía de la línea punteada cerca de $\vartheta = 50^\circ$, mientras que para la ventana cuadrada se desvía a los 70° .

A partir de estas comparaciones, se concluye que la geometría de la ventana es el factor que más influye en la linealidad de la respuesta. Al analizar la sensibilidad, se arriba a la conclusión de que, al aumentar el ancho de la ventana, de azul a verde en la Figura 2.8(b), la sensibilidad disminuye, y que, al aumentar la altura, de azul a rojo en la Figura 2.7(b), la sensibilidad aumenta.

En la Figura 2.9 se muestra cómo varía la I_{CC} en cada fotodiodo para las condiciones analizadas en las Figura 2.7 y Figura 2.8. Con ventanas más grandes, Figura 2.9(a), se obtiene una mayor área iluminada y, en consecuencia, corrientes más altas en $\vartheta = 0^\circ$. A medida que cambia la posición del Sol, el área iluminada también cambia, junto con el ángulo (ϑ). Como indica la Ec. 2.1, la I_{CC} está influenciada por ambos parámetros. Por lo tanto, las variaciones en ambos parámetros hacen que la curva de I_{CC} no sea trivial. Las curvas de I_{CC} simuladas facilitan en gran medida la caracterización de los sensores fabricados. Es importante señalar que, a pesar de que ambos diseños de ventanas tienen el mismo ancho de ventana r , el área iluminada total con las ventanas circulares es menor que con las ventanas cuadradas; por lo tanto, el rango de I_{CC} es diferente entre las geometrías. Por otro lado, aumentar h no varía la I_{CC} en $\vartheta = 0^\circ$, como se observa en la Figura 2.9(b). Sin embargo, a medida que h aumenta para un ϑ dado, la diferencia entre la salida de los fotodiodos también aumenta, lo que resulta en una mayor sensibilidad.

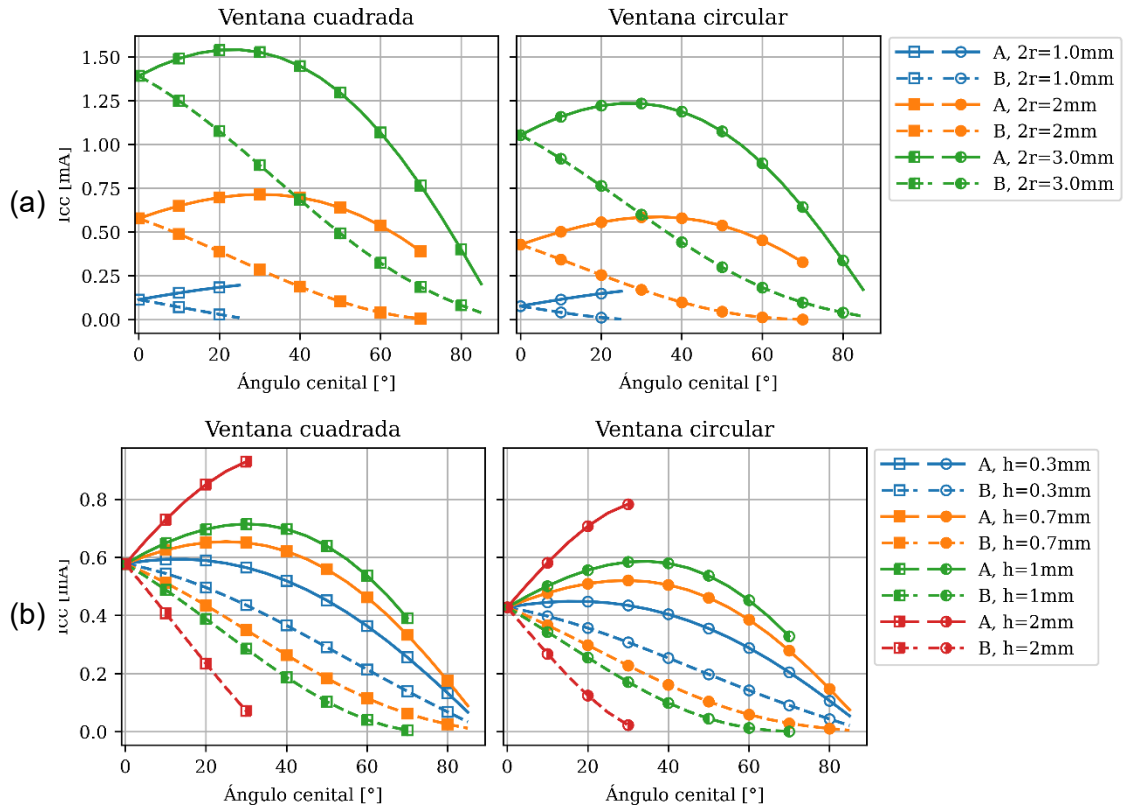


Figura 2.9. Simulación de la I_{CC} para diferentes tamaños (a), alturas (b) y geometrías de la ventana: cuadrada (izquierda) y circular (derecha).

Como se mencionó anteriormente, el diseño con detector de dos cuadrantes solo detecta variaciones en un eje, L_x , pero, como se define en la Ec. 2.4, L_x depende de los ángulos cenitales y azimutales de la posición del Sol. Por esta razón, es de interés simular la salida del sensor al variar ϑ_i y φ_i . Los ángulos cenitales y azimutales de la posición del Sol se variaron según la Figura 2.3. Para este análisis, en la Figura 2.10, se presenta la simulación del área iluminada y la función de transferencia de la configuración del sensor representada en la Figura 2.6(a), con una ventana de 2 mm de lado y un grosor de vidrio de 1 mm. Aunque este análisis se realizó para ambos diseños de ventanas, Figura 2.6 (a) y (b), en la Figura 2.10 solamente se muestran los resultados para el sensor con ventana cuadrada porque, en esta representación, las diferencias entre geometrías no son apreciables.

En la Figura 2.10(a) se observa cómo el área iluminada en cada fotodiodo se ve afectada por ambos ángulos, φ_i y ϑ_i . También es importante señalar que cuando el ángulo azimutal aumenta de 0 a 90° , la diferencia entre las áreas iluminadas disminuye, hasta que en $\varphi = 90^\circ$, el área iluminada es igual en ambos fotodiodos e independientes de ϑ , y el sensor se comporta como un CSS, donde la I_{CC} solo varía con el coseno del ángulo cenital. Dado que la función del área iluminada es simétrica con respecto a 180° de

azimut, este comportamiento también se observa en $\varphi = 270^\circ$, cuando la posición azimutal del Sol también es perpendicular al eje de medición.

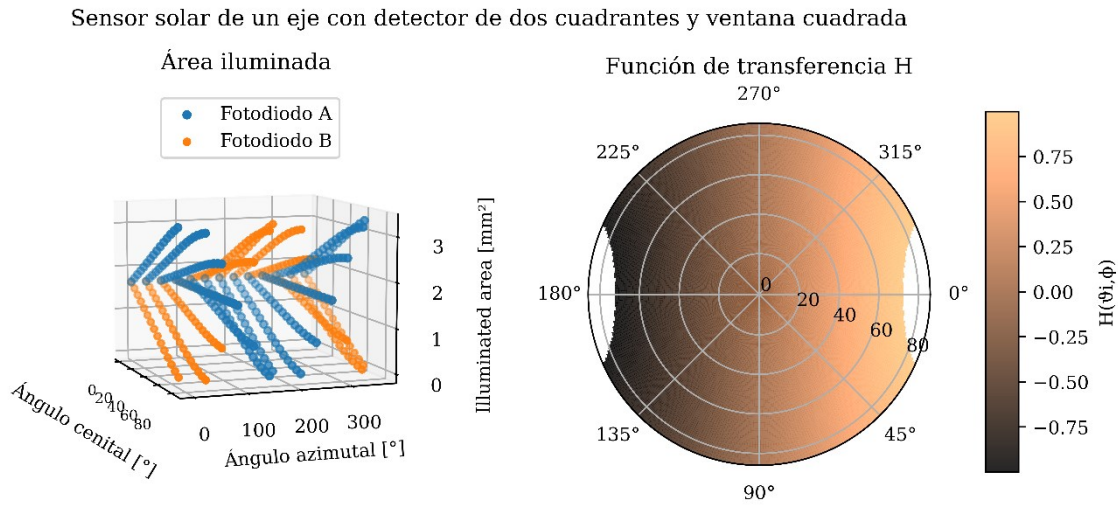


Figura 2.10. Simulaciones del sensor de un eje con detector de dos cuadrantes y ventana cuadrada de 2 mm de ancho y 1 mm de espesor. (a) Área iluminada en cada fotodiodo y (b) función de transferencia $H_{2C}(\theta, \varphi)$.

Por otro lado, en la Figura 2.10(b), se representa en un gráfico en coordenadas polares la función de transferencia del sensor al variar el ángulo cenital y azimutal del Sol. Se observa que, con esta configuración, el sensor solo proporciona información sobre el eje alineado con los ángulos 0° y 180° de azimut. Para una obtención representación tridimensional de la posición del Sol, se deben utilizar dos sensores que midan de forma perpendicular.

2.2.3. Diseño del sensor con fotodiodos triangular y rectangular

En el segundo diseño de sensor solar de posición de un eje, también se utiliza una ventana para limitar la radiación incidente, sin embargo, el área iluminada en el detector queda determinada principalmente por la geometría de los fotodiodos. El diseño que se presenta en la Figura 2.11(a) en una vista en perspectiva, está compuesto por un detector con dos fotodiodos integrados, uno de geometría triangular y el otro rectangular, y una ventana rectangular separada una distancia h . La ventana rectangular de ancho $2r$ se extiende a todo lo ancho del detector, de forma tal que solo limita luz en un eje y se ilumina de forma homogénea una sección longitudinal del detector. Cuando el Sol se encuentra en 0 o 180° de azimut, el área iluminada en el fotodiodo triangular varía en función del ángulo cenital, mientras que en el fotodiodo rectangular el área iluminada se mantiene constante para todos los ángulos. Esto se puede observar en la Figura 2.11(b) desde una vista superior del detector, al ser iluminado con un ángulo ϑ_i y φ_i .

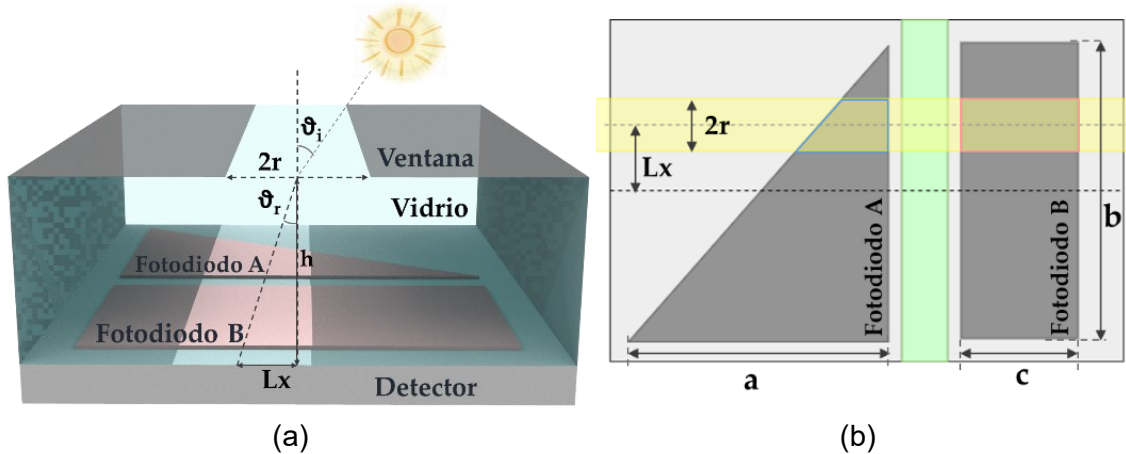


Figura 2.11. (a) Diseño del sensor de posición de un eje con fotodiodos triangular y rectangular, (b) Vista superior del detector iluminado para analizar el área iluminada en cada fotodiodo.

En esta configuración, el límite máximo de detección (L_x^{MAX} , Ec. 2.20) queda definido por el punto donde el extremo del área iluminada coincide con el borde del área activa de ambos fotodiodos y deja de ser constante el área iluminada del fotodiodo de rectangular. A partir de la Ec. 2.20 se puede concluir que el FOV, que depende de L_{MAX} , está limitado por la altura de los fotodiodos (b) y el ancho de la ventana ($2r$).

$$L_x^{max} \text{ triangular} = \frac{b}{2} - r \quad (2.20)$$

El área iluminada de los fotodiodos triangular (A) y rectangular (B) queda definida por las Ec. 2.21 y 2.22, respectivamente. En estas ecuaciones, a representa el ancho del fotodiodo triangular, mientras que c denota el ancho del fotodiodo rectangular.

$$A_A = \frac{ar}{b}(b - 2L_x) \quad (2.21)$$

$$A_B = c * 2r \quad (2.22)$$

En esta propuesta, la posición del Sol se calcula a partir del área iluminada en el detector triangular. Para fines comparativos, se definió que el ancho del fotodiodo rectangular sea tal que el área iluminada sea igual en ambos fotodiodos en $\vartheta = 0^\circ$ e igualando las Ec. 2.21 y 2.22 se obtiene que c debe ser la mitad de a . Para extraer la información del área iluminada de la I_{CC} del fotodiodo triangular, esta se normaliza con la I_{CC} del fotodiodo rectangular, de forma que se simplifique de la ecuación la J_{CC} y la dependencia con el coseno del ángulo cenital. Al fotodiodo rectangular se lo denomina fotodiodo de referencia porque su área iluminada es constante y su I_{CC} se utiliza para normalizar la

respuesta del sensor. La función de transferencia $H(L_x)$ en este diseño se plantea en la Ec. 2.23.

$$H(L_x) = \frac{A_{ilum}^A - A_{ilum}^B}{A_{ilum}^B} = \frac{ab - 2cb - 2aL_x}{2cb} = -\frac{2L_x}{b}. \quad (2.23)$$

De la Ec. 2.23 se puede concluir que la función de transferencia y la sensibilidad de este diseño son independientes del ancho de la ventana; que la sensibilidad del diseño es inversamente proporcional a la altura b de los fotodiodos. Cuando se reduce r , es posible disminuir b sin comprometer el FOV. En consecuencia, la sensibilidad del sensor puede mejorarse sin afectar negativamente el FOV. Aunque la sensibilidad del sensor no se ve afectada por el ancho de la ventana, este último define significativamente el rango de operación de la I_{CC} . La elección del ancho de la ventana puede adaptarse para coincidir con el rango de I_{CC} deseado específico del sensor. Es importante resaltar que en esta propuesta la respuesta del sensor y su FOV son independientes de la separación entre los fotodiodos.

2.2.4. Simulación del sensor con fotodiodos triangular y rectangular

Con el objetivo de evaluar cómo influye el tamaño de los fotodiodos, así como la altura y el tamaño de la ventana en la respuesta del sensor se realizaron simulaciones de este diseño cuando el ángulo azimutal es 0° y 180° . Para realizar la simulación, se tuvo en cuenta que el detector tiene un área total de 12 mm x 12 mm, que cada fotodiodo tiene contactos de 1 mm de ancho en total, además se consideró una barrera de SiO_2 de 1 mm de ancho, que si bien este valor no influye en la respuesta del detector es necesario para determinar el ancho que pueden tener los fotodiodos. Por otro lado, para garantizar que ambos fotodiodos tengan igual área iluminada en $L_x = 0$, el ancho del fotodiodo rectangular (c) debe ser la mitad del ancho triangular.

En base a estas condiciones, se fijó que el fotodiodo triangular tiene una base de 6 mm y el fotodiodo rectangular tiene un ancho de 3 mm. Para definir qué altura de los fotodiodos es más conveniente para el diseño, se analizaron tres casos: es menor, igual o mayor que el ancho de la base del triángulo (a).

Como se muestra en la simulación de la Figura 2.12, el área iluminada del fotodiodo triangular aumenta al aumentar ϑ , en $\varphi = 0^\circ$, validando el modelo propuesto para la representación de la Figura 2.11. En la Figura 2.12 se presentan los resultados de la simulación para los diferentes valores de b , con una ventana de $h = 1$ mm y $2r = 2$ mm.

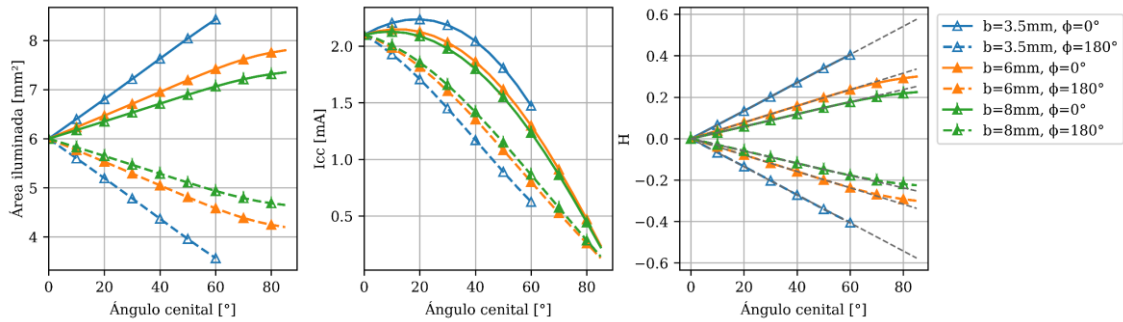


Figura 2.12. Simulaciones del sensor de un eje con fotodiodo triangular para diferentes alturas del triángulo, con $a = 6\text{ mm}$, $h = 1\text{ mm}$ y $2r = 2\text{ mm}$. Área iluminada (izquierda) e I_{cc} del fotodiodo triangular (centro), y la función de transferencia del sensor (derecha). Las regresiones lineales están indicadas con líneas grises discontinuas.

De la simulación se concluye que, si el fotodiodo triangular tiene una altura menor a la base se puede limitar el FOV y que si tiene mayor altura que la base, disminuye la sensibilidad del instrumento. En la simulación de la función de transferencia en la Figura 2.12(c), se aprecia el comportamiento del fotodiodo B como referencia. A partir de las regresiones lineales, se confirmó que H es lineal en un FOV de 60° , considerando las variaciones en b . La simulación revela que, incluso pequeños cambios en b afectan significativamente la sensibilidad, linealidad y FOV del sensor. Al reducir b , la sensibilidad de la función de transferencia mejora de 3×10^{-3} a $6,8 \times 10^{-3} \text{ 1/}^\circ$. Sin embargo, este resultado es comparativamente menor que los resultados obtenidos para la configuración del detector de dos cuadrantes.

Al variar la altura de la ventana para un ancho fijo de la ventana (Figura 2.13), con $b = 6\text{ mm}$, se observa que, a mayor altura de la ventana, mayor sensibilidad del sensor, similar a los resultados obtenidos para el sensor con detector de dos cuadrantes.

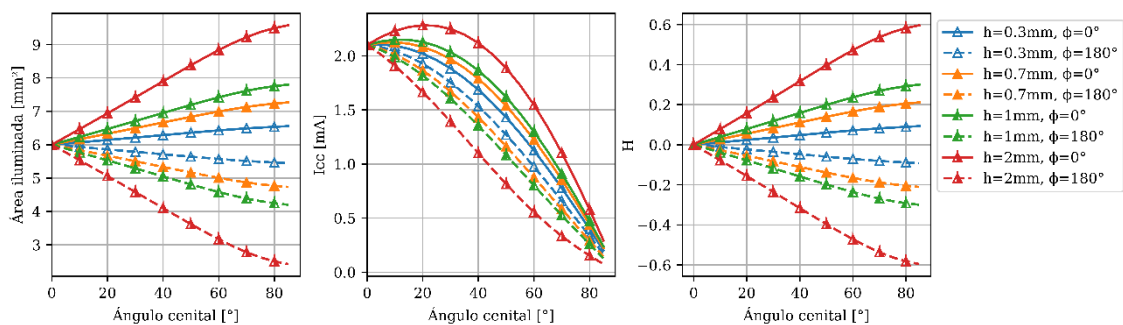


Figura 2.13. Simulaciones del sensor de un eje con fotodiodo triangular para diferentes alturas de la ventana, con $a = b = 6\text{ mm}$, $c = 3\text{ mm}$ y $2r = 2\text{ mm}$. Área iluminada (izquierda) e I_{cc} (centro) del fotodiodo triangular, y la función de transferencia del sensor (derecha).

En la Figura 2.14, se puede observar que, a medida que aumenta el ancho de la ventana ($2r$), cuando $a = b = 6$ mm y $h = 1$ mm, se obtiene un mayor rango de I_{CC} en el fotodiodo triangular, mientras que la función de transferencia no cambia.

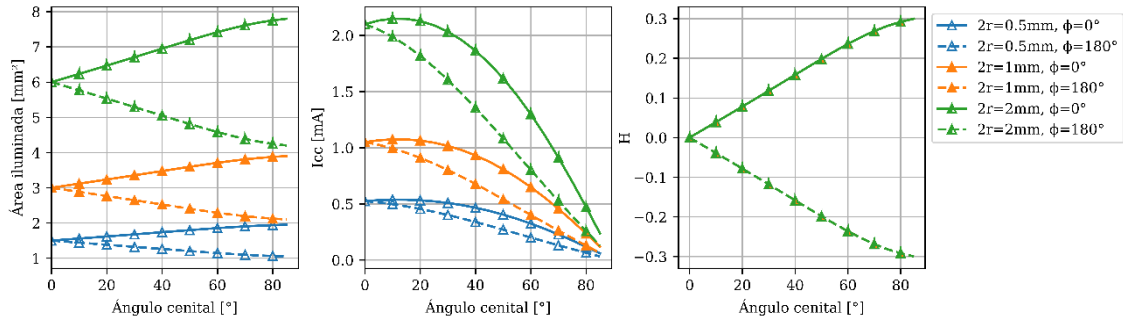


Figura 2.14. Simulaciones del sensor de un eje con fotodiodo triangular para diferentes tamaños de la ventana, con $a = b = 6$ mm y $h = 1$ mm. Área iluminada (izquierda) e I_{CC} del fotodiodo triangular (centro), y la función de transferencia del sensor (derecha).

A partir de las simulaciones realizadas se recomienda que, para la fabricación del detector y la ventana, primero es necesario definir el ancho de la ventana en función del rango o intervalo de corriente deseado y en base a esto, definir la altura de la ventana que brinda los mejores resultados sensibilidad, FOV y linealidad.

2.2.5. Comparación entre los sensores de un eje

El último experimento planificado para los sensores de un eje implicó realizar un análisis comparativo de la función de transferencia de las tres propuestas: detector de dos cuadrantes con ventana cuadrada, con ventana circular y detector con fotodiodos triangular y rectangular. Para la comparación se consideró que las tres configuraciones operen en condiciones similares. Con este propósito, se eligió para cada configuración la misma altura de ventana, $h = 1$ mm, y se seleccionaron las dimensiones para obtener un valor de I_{CC} similar en $\vartheta = 0^\circ$ de $\sim 0,5$ mA, de modo que los tres diseños tengan rangos de operación similares. Los parámetros de simulación para el sensor con detector de dos cuadrantes se establecieron de la siguiente manera: una ventana circular con $r = 1,1$ mm y una ventana cuadrada de 1,9 mm de lado.

En el caso del detector con fotodiodo triangular, dado que la I_{CC} deseada en $\vartheta = 0^\circ$ es menor que la analizada en las simulaciones en la Figura 2.12, se seleccionó la ventana más estrecha simulada en la Figura 2.14. En consecuencia, se analizaron valores más pequeños de b para mejorar la sensibilidad, sin reducir significativamente el FOV. Luego de realizar varias simulaciones variando la altura b de los fotodiodos, considerando $a = 6$ mm, $c = 3$ mm, $h = 1$ mm y $2r = 0,5$ mm, se determinó que $b = 2$ mm proporciona la

mejor sensibilidad dentro de un FOV de 60°. En la Figura 2.15 se presenta la comparación de los tres diseños.

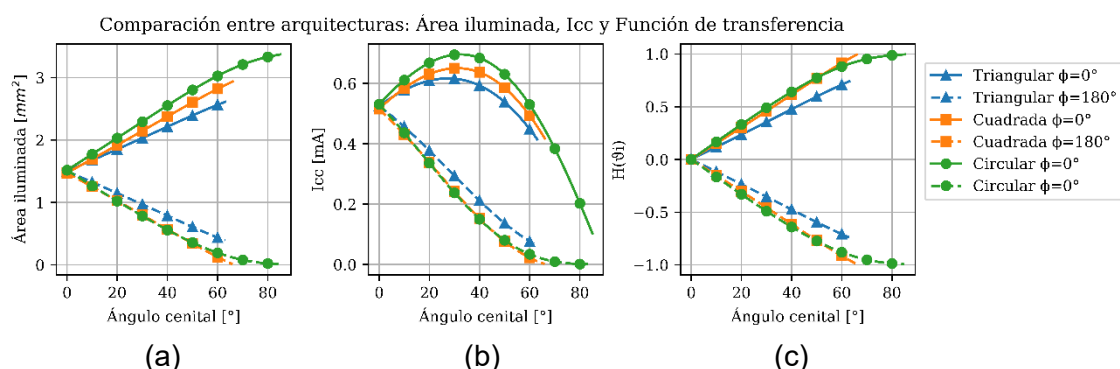


Figura 2.15. Comparación de los tres diseños propuestos con un vidrio de 1 mm de espesor. (a) Área iluminada, (b) I_{CC} simulada del fotodiodo A de cada diseño, (c) función de transferencia simulada de los tres diseños propuestos.

En la Figura 2.15(a), se presenta la comparación del área iluminada simulada del fotodiodo A de cada diseño; en la Figura 2.15(b), se ilustra la comparación de la I_{CC} simulada para cada diseño; y la comparación de la función de transferencia simulada se presenta en la Figura 2.15(c). El análisis de los resultados de cada diseño simulado se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Comparación de los diseños.

Parámetro	Diseño		
	Triangular	Cuadrada	Circular
FOV [°]	63	66	Sin obstrucción
Sensibilidad [1/°] (hasta $\vartheta_i = 45^\circ$)	0,012	0,015	0,016
$I_{CC}(0^\circ)$ [μA]	525	515	531
I_{CC}^{MAX} [μA]	616	650	696

Al comparar los diseños, se observa que tanto el diseño con una ventana cuadrada como el del detector con fotodiodo triangular exhiben una respuesta lineal. Sin embargo, el diseño con el fotodiodo triangular ofrece una sensibilidad menor que la configuración de dos cuadrantes en condiciones similares. Por otro lado, el sensor con una ventana circular muestra una sensibilidad ligeramente mejor en un FOV de 45°.

Se concluyó que la linealidad de la función de transferencia está determinada por la geometría de la ventana o el fotodiodo. En el diseño de ventana cuadrada, la ventana es más estrecha que en el caso de la ventana circular para cumplir con el requisito de I_{CC} . Como resultado, el FOV calculado también es más pequeño. Para la ventana circular, se predice un FOV sin obstrucciones; sin embargo, la función de transferencia muestra una gran pérdida de sensibilidad para ángulos superiores a $\vartheta_i = 60^\circ$. Esto

evidencia que el FOV efectivo de los sensores no siempre es tan amplio como se predice inicialmente y debe analizarse en cada caso. Con la ventana circular, se mejoró la sensibilidad gracias a su geometría. Para ángulos cercanos a 0° , es decir L_x cercano a 0, la diferencia entre las áreas iluminadas es mayor que para valores más grandes de L_x . Debido a la geometría circular de la ventana, el área iluminada total no es constante, aumenta a medida que L_x aumenta. En cambio, con la ventana cuadrada, el área iluminada total es constante, y la diferencia entre las áreas iluminadas se define mediante una función lineal. La ventana circular tendrá una ventaja sobre la ventana cuadrada en cuanto a la alineación entre la ventana y el detector, ya que solo se debe considerar el error de alineación con respecto a los ejes x e y . Sin embargo, con la ventana cuadrada, también debe considerarse que la ventana puede estar rotada con respecto del detector y esto añade un error de alineación angular, que modifica la geometría del área iluminada en cada fotodiodo, por tanto, la función de transferencia medida.

2.3. Sensores solares finos de dos ejes

Para determinar la posición del Sol, en una representación de tres dimensiones (ángulos cenital y azimutal, Figura 2.2) es necesario utilizar un detector que sea sensible a la variación de L_x y L_y (Figura 2.3). El sensor que es capaz de determinar ambos ángulos se denomina sensor de posición de dos ejes. Los diseños que se presentan para medir en dos ejes tienen el mismo principio de funcionamiento que los sensores de un eje propuestos: un detector y una ventana separada una distancia h , que direcciona la luz hacia una zona específica del detector en función de la posición del Sol. En base a los diseños de un eje propuestos, se diseñaron dos configuraciones del sensor solar de posición de dos ejes.

La primera configuración consiste en un detector formado por un arreglo de cuatro fotodiodos, dispuestos en cuatro cuadrantes, de forma tal que se obtienen dos sensores de un eje de dos cuadrantes perpendiculares entre sí. Para esta configuración se diseñaron una ventana cuadrada y otra circular y se evaluó mediante simulación como la geometría de la ventana afecta la respuesta del sensor de dos ejes.

Para la segunda configuración, se utilizó como base el sensor de un eje con fotodiodo triangular y fotodiodo rectangular de referencia, a esta configuración se le añadió un tercer fotodiodo para la medición en el otro eje, y se modificó la geometría de la ventana. De esta forma, el detector consiste en un arreglo de tres fotodiodos, uno para cada eje

y uno de referencia común a ambos ejes. Este diseño se evaluó mediante simulación y se comparó con el diseño de cuatro cuadrantes.

2.3.1. Diseño del sensor con detector de cuatro cuadrantes

El diseño del sensor con detector de cuatro cuadrantes se presenta en la Figura 2.16(a), con una ventana cuadrada de lado $2r$ y en la Figura 2.16(c) con una circular de diámetro $2r$.

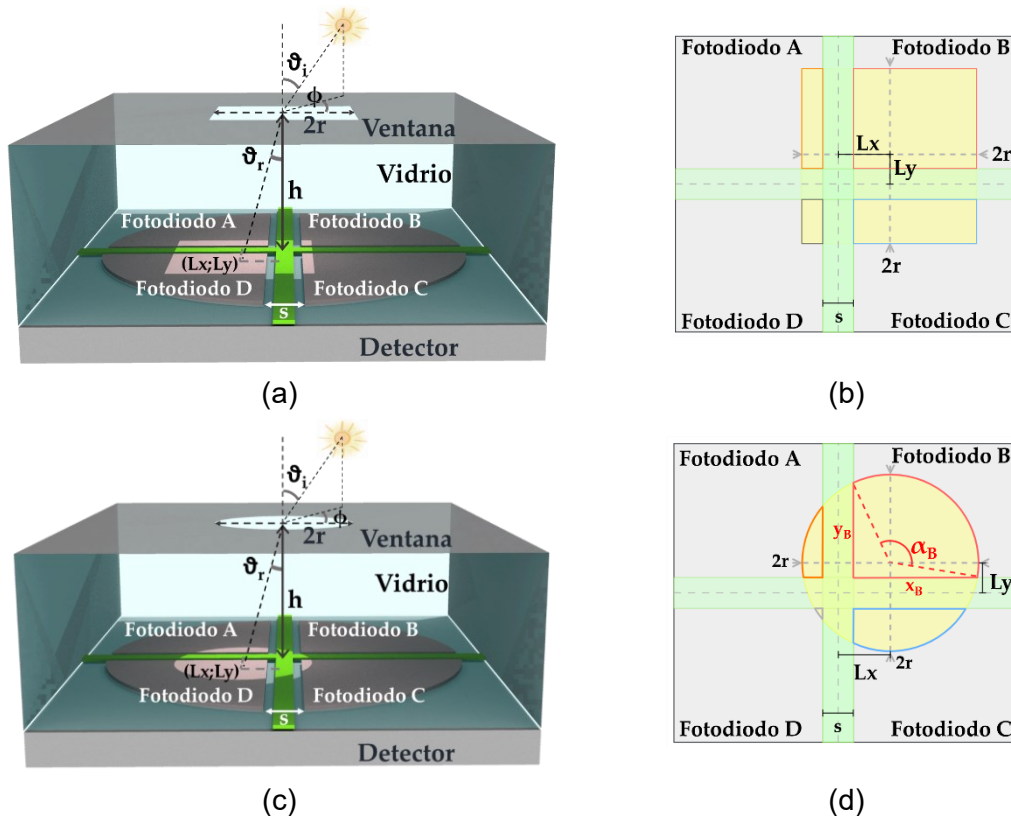


Figura 2.16. Diseño del sensor solar de posición de dos ejes con detector de cuatro cuadrantes y la vista superior del detector para analizar el área iluminada en función de la geometría de la ventana: (a) y (b) cuadrada, (c) y (d) circular.

Para obtener el arreglo de cuatros fotodiodos integrados en el sustrato de silicio, se diseñaron dos barreras de SiO_2 de ancho $s = 150 \mu\text{m}$. El centro de la ventana está alineado con el centro de la matriz de fotodiodos, de forma tal que cuando la luz incide de forma normal, el área iluminada es igual en los 4 fotodiodos. En la Figura 2.16(b) se presenta la vista superior del detector iluminado para analizar el área iluminada en cada fotodiodo en función de la ventana.

Como los fotodiodos forman cuatro cuadrantes, se pueden plantear dos funciones de transferencia, $H(L_x)$ y $H(L_y)$, similares a la Ec. 2.16 de los sensores de un eje, donde se agrupan los fotodiodos de interés para cada eje según las Ec. 2.24 y 2.25.

$$H(L_X) = \frac{(I_{CC}^A + I_{CC}^D) - (I_{CC}^B + I_{CC}^C)}{I_{CC}^A + I_{CC}^B + I_{CC}^C + I_{CC}^D} = \frac{(A_{ilum}^A + A_{ilum}^D) - (A_{ilum}^B + A_{ilum}^C)}{A_{ilum}^A + A_{ilum}^B + A_{ilum}^C + A_{ilum}^D} \quad (2.24)$$

$$H(L_Y) = \frac{(I_{CC}^A + I_{CC}^B) - (I_{CC}^C + I_{CC}^D)}{I_{CC}^A + I_{CC}^B + I_{CC}^C + I_{CC}^D} = \frac{(A_{ilum}^A + A_{ilum}^B) - (A_{ilum}^C + A_{ilum}^D)}{A_{ilum}^A + A_{ilum}^B + A_{ilum}^C + A_{ilum}^D} \quad (2.25)$$

En el caso de la ventana cuadrada, área iluminada en cada fotodiodo queda determinada por las Ec. 2.26 a 2.29.

$$A_A = \left(r - L_X - \frac{s}{2}\right) \left(r + L_Y - \frac{s}{2}\right) \quad (2.26)$$

$$A_B = \left(r + L_X - \frac{s}{2}\right) \left(r + L_Y - \frac{s}{2}\right) \quad (2.27)$$

$$A_C = \left(r + L_X - \frac{s}{2}\right) \left(r - L_Y - \frac{s}{2}\right) \quad (2.28)$$

$$A_D = \left(r - L_X - \frac{s}{2}\right) \left(r - L_Y - \frac{s}{2}\right) \quad (2.29)$$

En la Figura 2.16(d) se observa que, al utilizar una ventana circular, el área iluminada en cada fotodiodo es una porción del círculo que ilumina la ventana, la cual está delimitada por el triángulo formado por los lados x e y más el segmento circular correspondiente al ángulo central alfa (α), como se plantea en la Ec. 2.30. Donde la letra i hace referencia a cada fotodiodo.

$$A_i = \frac{x_i * y_i}{2} + \frac{1}{2} r^2 (\alpha_i - \text{sen}(\alpha_i)) \quad (2.30)$$

El ángulo central α_i correspondiente a cada fotodiodo se calcula según la Ec. 2.31:

$$\alpha_i = 2 * \arcsen\left(\frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{2r}\right) \quad (2.31)$$

Los lados x e y del área iluminada en cada fotodiodo se calculan según las Ec. 2.32 a 2.39.

$$x_A = \sqrt{\left(r^2 - \left(\frac{s}{2} - L_Y\right)^2\right) - L_X - \frac{s}{2}} \quad (2.32)$$

$$y_A = \sqrt{\left(r^2 - \left(-\frac{s}{2} - L_X\right)^2\right) + L_Y - \frac{s}{2}} \quad (2.33)$$

$$x_B = \sqrt{\left(r^2 - \left(\frac{S}{2} - L_Y\right)^2\right)} + L_X - \frac{S}{2} \quad (2.34)$$

$$y_B = \sqrt{\left(r^2 - \left(\frac{S}{2} - L_X\right)^2\right)} + L_Y - \frac{S}{2} \quad (2.35)$$

$$x_C = \sqrt{\left(r^2 - \left(-\frac{S}{2} - L_Y\right)^2\right)} + L_X - \frac{S}{2} \quad (2.36)$$

$$y_C = \sqrt{\left(r^2 - \left(\frac{S}{2} - L_X\right)^2\right)} - L_Y - \frac{S}{2} \quad (2.37)$$

$$x_D = \sqrt{\left(r^2 - \left(-\frac{S}{2} - L_Y\right)^2\right)} - L_X - \frac{S}{2} \quad (2.38)$$

$$y_D = \sqrt{\left(r^2 - \left(-\frac{S}{2} - L_X\right)^2\right)} - L_Y - \frac{S}{2} \quad (2.39)$$

En esta configuración, al usar una ventana circular, L_{MAX} queda definida en cada eje por la Ec. 2.40, tomando como criterio para L_{MAX} que la suma del área iluminada de dos fotodiodos adyacentes sea mayor que cero. En esta configuración, se reafirma la necesidad de lograr integrar los fotodiodos lo más cercanos posible para que no se vea afectado el FOV del sensor.

$$L_{X,Y}^{MAX}{}_{4C\bullet} = \sqrt{r^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2} - \frac{S}{2} \quad (2.40)$$

2.3.2. Simulación del sensor con detector de cuatro cuadrantes

La simulación del sensor de posición de dos ejes con un detector de cuatro cuadrantes se realiza con dos objetivos. Por un lado, para evaluar y validar, mediante simulación, el modelo propuesto del área iluminada en cada fotodiodo en el modelo propuesto. Por otro lado, para definir los parámetros de fabricación de los sensores y tener una curva de respuesta ideal. En este sentido, es de interés establecer una curva ideal que represente el comportamiento de la I_{CC} de cada fotodiodo y la función de transferencia del sensor en relación con la posición del Sol. Esta respuesta ideal permite analizar el comportamiento de los dispositivos fabricados, así como ajustar los parámetros en función del rango de corriente deseado del sensor.

Los parámetros que se consideraron para la simulación, como el tamaño de la ventana, el grosor del vidrio y la separación de los fotodiodos se resumen en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros considerados en las simulaciones.

Parámetros	Símbolo	Valor
Altura de la ventana [mm]	h	1
Ancho de la ventana [mm]	r	1
Separación entre áreas activas [mm]	s	0,35
J_{CC} en AM0 [mA/mm^2]	J_{CC}	0,35

La simulación del área iluminada para estas condiciones se muestra en la Figura 2.17. Donde se confirma que el modelo que representa el área iluminada en cada fotodiodo en función de la posición del Sol exhibe el comportamiento deseado. Para validar el modelo de configuración del detector de cuatro cuadrantes, se analizaron las variaciones en las áreas iluminadas. Para cada fotodiodo, el área iluminada es igual cuando el ángulo cenital es 0° , y alcanza su máximo valor cuando el Sol se encuentra en diagonal al cuadrante donde se encuentra el fotodiodo, como se muestra en la Figura 2.16(c) con referencia a la representación de la posición del Sol en la Figura 2.3. Por ejemplo, con el Sol en $\varphi = 45^\circ$, el fotodiodo A exhibe la mayor área iluminada al variar ϑ , como se muestra en la Figura 2.17.

La segunda simulación (Figura 2.18) proporciona el rango de la I_{CC} , identificando la posición del Sol en la que la corriente alcanza su valor máximo.

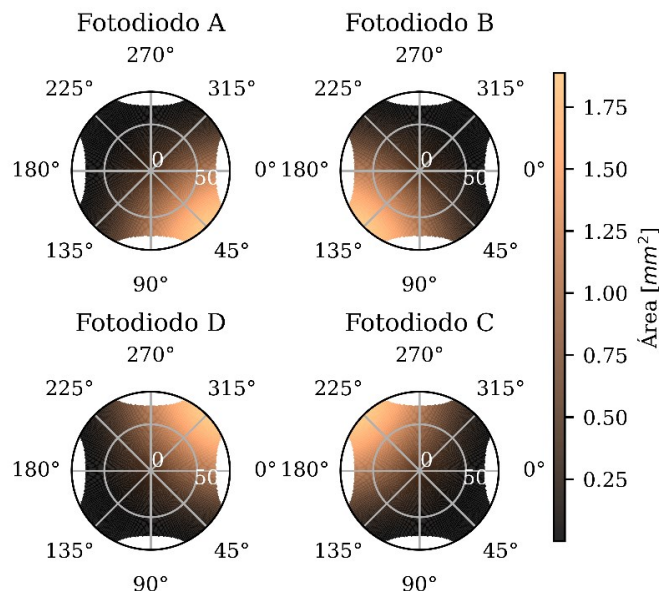


Figura 2.17. Simulación del área iluminada de cada fotodiodo en función de la posición del Sol al utilizar una ventana circular.

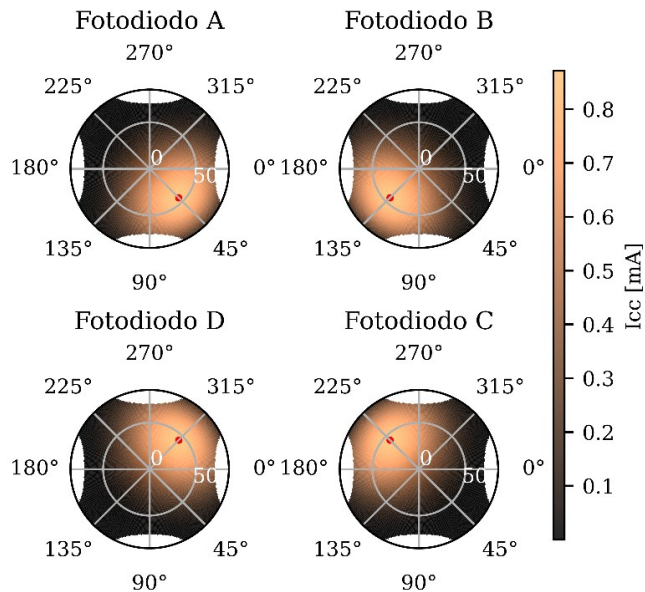


Figura 2.18. Simulación de la I_{CC} de cada fotodiodo del sensor con detector de cuatro cuadrantes y ventana circular, en función de la posición del Sol.

De la Figura 2.18, se extrae que el valor máximo de la I_{CC} en estas condiciones es de 0,87 mA en un ángulo cenital de 44° y ángulos de azimut de 45°, 135°, 225° y 315° para los fotodiodos A, B, C y D, respectivamente, y se indican con un punto rojo en la Figura 2.18. Aunque la simulación con la ventana cuadrada no se muestra, cuando se emplea una ventana cuadrada, el valor máximo de I_{CC} se obtiene a un ángulo cenital de 40°, con un valor de I_{CC} igual a 1 mA.

Las simulaciones de las funciones de transferencia se muestran en la Figura 2.19 en un gráfico en coordenadas polares. Cada función varía entre -1 y 1, y solo varía en uno de los ejes de medición.

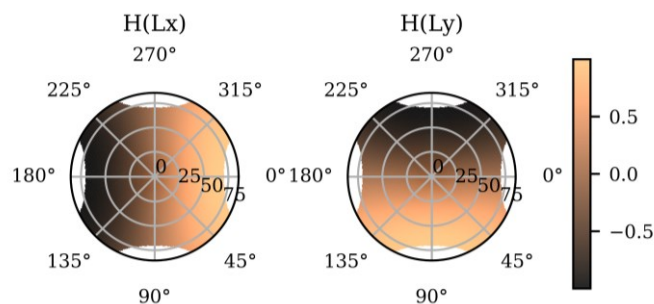


Figura 2.19. Simulación de la función de transferencia de cada eje (H_X^{4C} , H_Y^{4C}) del sensor de dos ejes con detector de cuatro cuadrantes y ventana circular.

2.3.3. Diseño del sensor basado en fotodiodo triangular

La segunda propuesta de sensor solar para medir en dos ejes se basa en el sensor con fotodiodo triangular. En este caso se incorporó un tercer fotodiodo, que es sensible a

variaciones de la posición del Sol en el eje perpendicular al del fotodiodo triangular, de forma tal que se tienen dos sensores de un eje midiendo perpendicularmente. Para optimizar el área del detector y solamente añadir pequeñas modificaciones a la geometría de la ventana que no afecten el modelo propuesto para el fotodiodo triangular, se definió el diseño de la Figura 2.20. Donde el tercer fotodiodo es rectangular, y su área iluminada queda definida por la geometría de la ventana, como se ilustra en la Figura 2.20(b), similar al fotodiodo del detector de dos cuadrantes con ventana cuadrada. Para lograr esto se consideró que la ventana ilumine uniformemente las secciones transversales de los fotodiodos A y B, y que no abarque todo el ancho del detector.

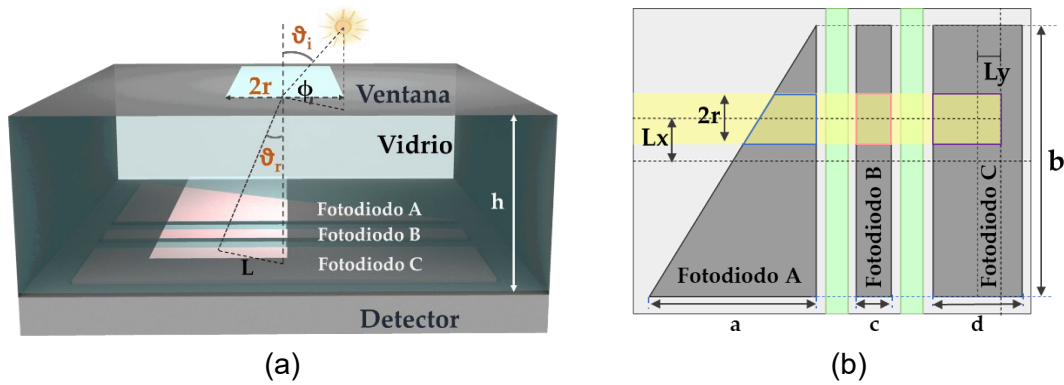


Figura 2.20. (a) Diseño del sensor de dos ejes con un fotodiodo triangular y una ventana rectangular. (b) Vista superior del detector para analizar el área iluminada en cada fotodiodo.

En $\vartheta = 0^\circ$, el borde de la ventana se alinea con el centro del fotodiodo C, en $d/2$. En este diseño, el fotodiodo B se utiliza como referencia para ambos ejes. Cuando el cambio de la posición del Sol implica variaciones en L_x , el área iluminada del fotodiodo A cambia, y cuando implica variaciones en L_y , el área iluminada en el fotodiodo C cambia.

Las modificaciones realizadas en este diseño son que L_y^{MAX} se define por la Ec. 2.41 y el área iluminada en el fotodiodo C se define según la Ec. 2.42.

$$L_y^{max} = \frac{d}{2} \quad (2.41)$$

$$A_{illum}^C = 2r * \left(\frac{d}{2} + L_y \right) \quad (2.42)$$

La función de transferencia para el eje y responde a la siguiente ecuación:

$$H(L_y) = \frac{I_{CC}^C - I_{CC}^B}{I_{CC}^B} = \frac{d}{2c} + \frac{L_y}{c} - 1 = \frac{2L_y}{a} \quad (2.43)$$

Para lograr que la función de transferencia que sea 0 en $\vartheta = 0^\circ$, es necesario elegir un valor para d tal que la Ec. 2.43 sea 0 cuando L_Y es 0. En consecuencia, d debe ser igual a $2c$. Dado que c debe ser $a/2$ para asegurar condiciones similares para $H(L_X)$, como se discutió anteriormente, entonces los fotodiodos A y C deben ser del mismo ancho. Por otro lado, las funciones de transferencia de ambos ejes serán simétricas solo si a y b son iguales. La sensibilidad del eje x estará definida por b , y la del eje y estará definida por a . En este diseño, el FOV del sensor se define de forma independiente para cada eje de medición según lo definido en las Ec. 2.20 y Ec. 2.41.

De forma análoga al sensor de un eje, la separación entre fotodiodos en esta configuración no afecta la respuesta del sensor. En contraste con la configuración de cuatro cuadrantes, esta arquitectura del sensor presenta solo tres fotodiodos.

2.3.4. Simulación del sensor basado en fotodiodo triangular

Para simular la salida del sensor, se tomaron algunas consideraciones, teniendo en cuenta las observaciones hechas en el modelo. Para obtener un detector con un tamaño de 12 mm x 12 mm, se definió un fotodiodo triangular de 2 mm de ancho, y con las consideraciones del modelo, el fotodiodo de referencia tiene un ancho de 1 mm, y el ancho del fotodiodo rectangular C (d) también es de 2 mm. Para obtener la misma sensibilidad en ambos ejes, se simuló una configuración del detector donde a y b tienen la misma longitud. Para otras combinaciones, la sensibilidad puede mejorar en el eje x , pero diferirá del eje y . Las simulaciones se realizaron considerando que $2r = 0,5$ mm y $h = 1$ mm. La simulación de la función de transferencia para cada eje se presenta en la Figura 2.21, donde se puede observar que el FOV no es simétrico para H_X y H_Y . Un r más pequeño resultará en un FOV más grande para el fotodiodo triangular, pero con un menor rango de corriente. El ancho de la ventana solo limita el FOV del eje x ; mientras que el del eje y está definido por el ancho del fotodiodo C.

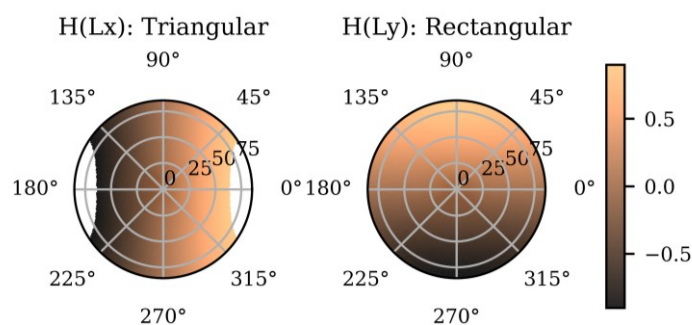


Figura 2.21. Simulación de la función de transferencia (H_X , H_Y) del sensor de dos ejes con fotodiodo triangular.

Para analizar la sensibilidad y el FOV, se realizó una comparación de la función de transferencia de cada eje en el mismo gráfico. A partir de la Figura 2.22, se puede concluir que la función de transferencia es lineal en un FOV de 60° para ambos ejes, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en las simulaciones de las secciones 2.2.2, para la geometría de la ventana cuadrada, y 2.2.4 para el fotodiodo triangular.

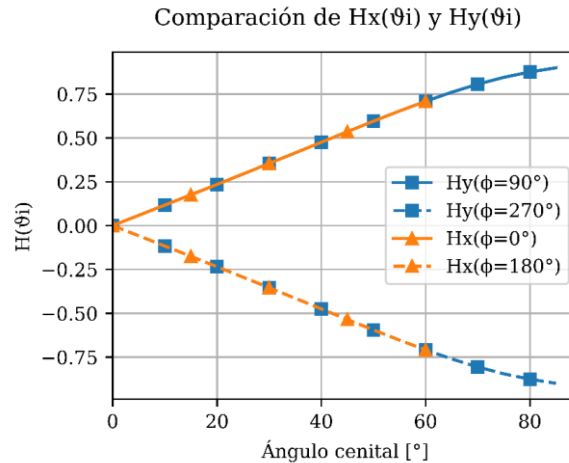


Figura 2.22. Comparación de la función de transferencia simulada (H_x , H_y) del sensor de dos ejes con fotodiodo triangular.

La Figura 2.23 muestra la I_{CC} simulada, considerando una J_{CC} de 35 mA/cm^2 .

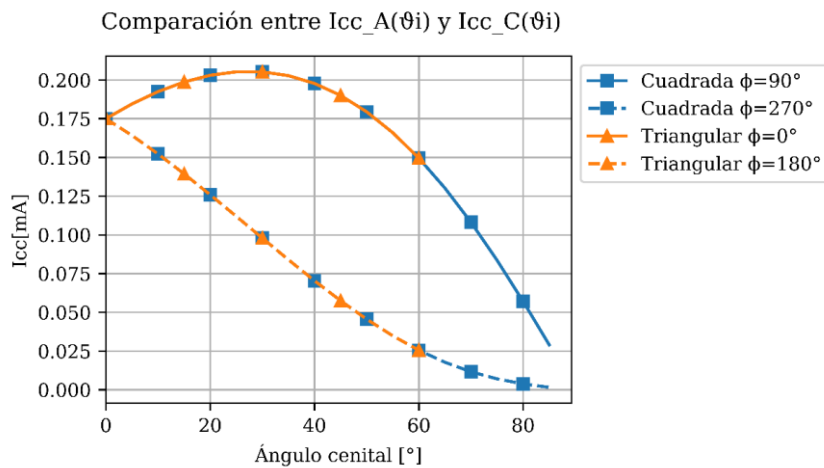


Figura 2.23. Comparación de la I_{CC} simulada de los fotodiodos triangular (A) y rectangular (C) con $a = b = d = 2 \text{ mm}$ y $2r = 0,5 \text{ mm}$.

2.4. Conclusiones

En este capítulo se describió el proceso de diseño de los sensores solares finos de posición que serán elaborados, caracterizados y ensayados en el marco de este trabajo. Se analizaron y compararon diferentes propuestas, con un principio de funcionamiento

compartido: un arreglo de fotodiodos donde el área iluminada es proporcional a la posición del Sol. Los diseños fueron concebidos para poder ser elaborados con las capacidades existentes en CNEA.

El proceso de diseño involucró la elección de la arquitectura del sensor, el modelado de su salida y luego la evaluación del modelo a través de simulaciones. Para simular la respuesta de los modelos, se desarrolló un programa en Python; el mismo permitió evaluar la sensibilidad y linealidad mediante regresiones lineales.

A partir de las simulaciones realizadas, se concluye que, dentro de cada diseño, los factores clave que influyen en la sensibilidad y en el FOV son la altura y el tamaño de la ventana, así como el tamaño del fotodiodo, dependiendo de la arquitectura del sensor.

Además, se concluye que, en general, ventanas más grandes implican áreas iluminadas más grandes, disminuyendo así el impacto de pequeñas variaciones en la posición del Sol, que representan una proporción menor del área total y, en consecuencia, tales configuraciones exhiben menor sensibilidad. Este análisis se realizó para un espesor de vidrio dado. Asimismo, se observó que, para un ancho fijo de la ventana, cuanto más grueso es el vidrio, mayor es la sensibilidad de la respuesta. Por otro lado, el FOV está determinado por la altura y el ancho de la ventana, y el tamaño y la posición de los fotodiodos en el plano del detector.

Al comparar las geometrías de los detectores, se concluye que, en el detector con fotodiodo triangular, la geometría del detector determina el área iluminada, influyendo así en gran medida en los parámetros del sensor. En particular, la relación de aspecto del fotodiodo triangular define la sensibilidad, mientras que la altura del triángulo define el FOV. En contraste, la geometría de los detectores de dos y cuatro cuadrantes no afecta el rendimiento del sensor, ya que el área iluminada está definida por la geometría de la ventana. En esta configuración, solo la separación entre los fotodiodos tiene implicaciones para el FOV.

De la comparación entre arquitecturas para las mismas condiciones de operación, se pudo concluir que el sensor con la configuración de detector de dos cuadrantes ofrece una mejor sensibilidad que el de fotodiodo triangular. Además, la combinación del detector de dos cuadrantes con una ventana circular presenta una mejor sensibilidad en un FOV de 45° que con una ventana cuadrada.

Adicionalmente, se determinó que el componente del sensor que define el patrón del área iluminada en los fotodiodos es el que define la linealidad de la respuesta; para el detector de dos cuadrantes, es la geometría de la ventana. Para una mejor linealidad de

la salida, se prefiere una ventana cuadrada. Sin embargo, a pesar de su menor linealidad, la ventana circular es una opción más adecuada en comparación con la ventana cuadrada. Esta preferencia se justifica por tener mayor sensibilidad y el beneficio adicional de la simetría, que tiene el potencial de reducir los errores de alineación. Por otro lado, el diseño que incorpora fotodiodos triangulares y rectangulares ofrece una ventaja tecnológica, ya que la respuesta no se ve afectada por la separación entre fotodiodos. Al comparar los valores de sensibilidad obtenidos con los reportados en trabajos previos de Boslooper et al. [6], se concluye que nuestros resultados están en el mismo orden de magnitud.

Una observación práctica sobre la función de transferencia es que idealmente varía de 0 a 1 en el FOV deseado. Esto implica que el sensor no responde fuera del FOV deseado y responde completamente dentro de él, maximizando así la sensibilidad dentro del rango de visión deseado. En consecuencia, es posible calcular la sensibilidad máxima que puede alcanzar el sensor dentro de un FOV específico.

Los diseños de sensores para medir en un eje se extrapolaron a sensores de dos ejes, capaz de determinar tanto los ángulos cenitales como azimutales del Sol. A partir de los resultados obtenidos, se definió que la respuesta deseada del sensor debe tener una salida lineal, con buena sensibilidad en un FOV de al menos 45°.

El análisis comparativo ha demostrado ser una herramienta importante que mejora el proceso de toma de decisiones al desarrollar nuevos productos para aplicaciones espaciales. Este análisis contribuyó principalmente a definir los parámetros de fabricación y las características de respuesta de los sensores de posición que se elaboraron en este trabajo. Los parámetros específicos de fabricación, como la separación entre fotodiodos, el ancho de contacto y el área total del detector de los sensores, se determinaron en base a la experiencia de fabricación de CSS y la tecnología disponible en el CNEA. Los otros parámetros de fabricación, como el área activa de los fotodiodos, el tamaño de las ventanas y el grosor del vidrio, se definieron por los resultados de las simulaciones.

Los resultados obtenidos del modelado se pueden utilizar para determinar la posición del Sol cuando el sensor está operativo. Tras la fabricación de los sensores, se propone determinar la posición del Sol siguiendo los siguientes pasos: medir la I_{CC} de cada fotodiodo, calcular H para derivar L_x y L_y , y finalmente, calcular los ángulos cenital y azimutal basados en L_x y L_y . Los modelos propuestos servirán como herramientas de evaluación de la respuesta de los sensores fabricados, ya que han demostrado ser útiles

para la detección y determinación de errores de alineación durante la caracterización de los prototipos elaborados.

Los diseños presentados son el primer paso en el proceso de desarrollo de sensores finos de posición solar fabricados a nivel nacional para obtener una representación en dos ejes de la posición del Sol. Los mismos representan un complemento de los CSS desarrollados desde hace dos décadas por el DES y se espera que, a futuro, formen parte del ADCS de un satélite.

Referencias

- [1] M. J. Tamasi, «Celdas Solares para Uso Espacial: Optimización de Procesos y Caracterización,» Tesis para optar al título de Doctor en Ciencia y Tecnología - Mención Física del Instituto Sábato, 2003.
- [2] C. G. Bolzi, M. G. Martínez Bogado y M. J. L. Tamasi, «Reseña del desarrollo de sensores solares en CNEA para misiones satelitales,» *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 31, p. 29–36, 2013.
- [3] A. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R. v. Swaaij y M. Zeman, *Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*, UIT Cambridge, 2016.
- [4] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [5] J. Plá, M. Tamasi, C. Bolzi, G. Venier y J. Durán, «Short circuit current vs cell thickness in solar cells under rear illumination: a direct evaluation of the diffusion length,» *Solid-State Electronics*, vol. 44, n° 4, pp. 719-724, 2000.
- [6] E. Boslooper, N. v. d. Heiden, D. Naron, R. Schmits, J. J. v. d. Velde y J. v. Wakeren, «BepiColombo Fine Sun Sensor,» de *International Conference on Space Optics — ICSSO 2012*, Ajaccio, Corse, 2012.

Capítulo 3

Fabricación de sensores solares finos

Los sensores diseñados tienen en común que emplean detectores compuestos por un arreglo de fotodiodos de silicio cristalino y que se emplea una ventana para limitar y direccionar la luz que llega al detector. La fabricación del arreglo de fotodiodos implica la elaboración localizada de cada fotodiodo en el sustrato de silicio, siguiendo pasos similares a los utilizados en la integración de circuitos microelectrónicos y utilizando como referencia la experiencia adquirida en la fabricación de sensores solares gruesos [59] y celdas solares para uso espacial [60]. En las próximas secciones se detallan los pasos para la elaboración del detector y la ventana, así como del soporte para integrar los componentes del sensor.

3.1. Fabricación del detector

Los detectores se elaboraron en sustratos de 4 pulgadas de Si-c Czochralski (Cz) tipo p de origen comercial, dopadas con boro y con orientación $\langle 100 \rangle$. Las obleas empleadas tienen un espesor de aproximadamente $600 \mu\text{m}$, con resistividad de $1 \Omega\text{cm}$ y pulido espejo en una de sus superficies. Para elaborar el detector de los FSS diseñados se siguieron los pasos que se muestran en la Figura 3.1.

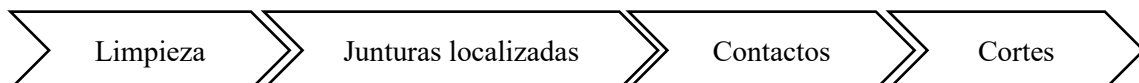


Figura 3.1. Pasos para elaboración del detector.

La primera etapa está enfocada en la preparación y limpieza de la muestra para los siguientes pasos de la fabricación. Para garantizar la limpieza de la oblea de silicio se realiza una limpieza orgánica seguida de una limpieza inorgánica. Una vez que la

muestra está en condiciones de continuar el proceso, se pasa a la etapa de elaboración de las juntas localizadas correspondientes a cada fotodiodo. En esta etapa se realizan procesos de oxidación, ataque al óxido, evaporación de metales y difusión de dopantes. Una vez elaboradas las juntas, se pasa a la etapa de formación o depósito de contactos metálicos, necesarios para extraer las cargas que se generan en la junta. Esta etapa consiste en un proceso de fotolitografía para definir la geometría de los contactos de la cara frontal seguido de la evaporación de una multicapa de Ti/Pd/Ag en ambas caras de la oblea. Posteriormente, se realiza un proceso de remoción de la fotorresina y el metal excedente que se encuentra sobre las áreas activas del detector (denominado *lift-off*) y finalmente se realiza un recocido de los contactos para mejorar el contacto óhmico. Así, la muestra está en condiciones de pasar a la etapa de corte para separar los detectores elaborados.

Se fabricaron en total, fotodiodos independientes, detectores de dos y cuatro cuadrantes, así como detectores con fotodiodos triangular y rectangular. Además, se hicieron estructuras de prueba para analizar diferentes separaciones entre fotodiodos y distribución de contactos.

Los procesos de fabricación se llevaron a cabo en el Laboratorio Fotovoltaico del Departamento Energía Solar (DES) y en la sala limpia del Departamento de Micro y Nano Tecnología (DMNT), ambas instalaciones se encuentran en el Centro Atómico Constituyentes de la CNEA.

3.1.1. Preparación de las muestras

El proceso de elaboración de los sensores se lleva a cabo en condiciones controladas, donde la limpieza de las obleas y el acondicionamiento de la superficie deben realizarse antes de prácticamente todos los pasos importantes del proceso. Debido a esto, el primer paso en la fabricación del detector es la limpieza, que consiste en eliminar partículas, átomos y películas no deseados del sustrato; ya que las impurezas pueden difundir hacia el volumen de la oblea durante los procesos térmicos posteriores e introducir niveles de energía intermedios en el gap del semiconductor, deteriorando la calidad del dispositivo. Con este proceso también se trata de dejar la superficie en una condición conocida y controlada, se eliminan daños producidos en la oblea por el corte del lingote de Si y se adapta la química de la superficie para lograr que sea hidrofílica o hidrofóbica. [3]

La limpieza es un proceso secuencial (Figura 3.2), diseñado para atacar una contaminación diferente en cada paso. El primer paso, limpieza orgánica, tiene como

objetivo eliminar partículas y compuestos orgánicos y tiene lugar en una solución de agua desionizada (DI), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) e hidróxido de amonio (NH_4OH), que actúa oxidando la superficie del silicio y, posteriormente, eliminando el óxido. Continuando con una limpieza inorgánica, donde se utiliza una solución de agua DI, peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y ácido clorhídrico (HCl), y es eficaz contra la contaminación metálica. El enjuague con agua DI y el secado con nitrógeno son partes esenciales del proceso de limpieza y preparación de las muestras.

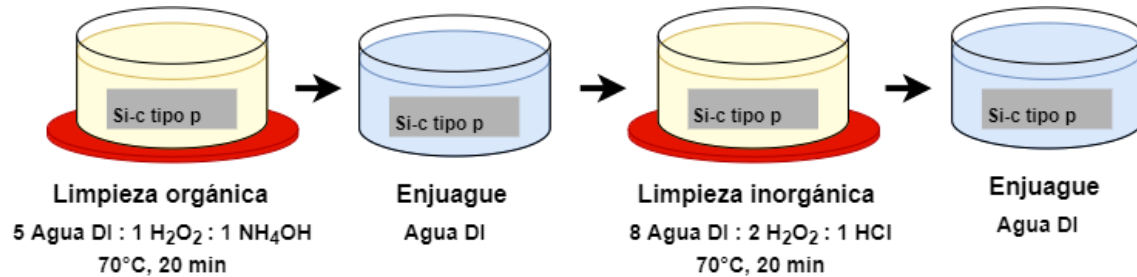


Figura 3.2. Secuencia de pasos de limpieza.

Para acondicionar la superficie, se realiza además un ataque químico en una solución con ácido fluorhídrico (HF) al 5% para remover el óxido nativo de la superficie, este tratamiento da como resultado una superficie hidrófoba terminada en hidrógeno. La limpieza en HF se realiza después de la limpieza inorgánica y previo a los procesos de oxidación y de evaporación de aluminio.

3.1.2. Elaboración de la juntura

Una vez que la muestra está en condiciones de continuar el proceso, se pasa a la etapa de formación de la juntura frontal $n+/p$ y posterior $p/p+$ de manera simultánea para cada fotodiodo, crucial para el funcionamiento del dispositivo. Para la elaboración de los fotodiodos de forma localizada se siguieron los pasos que se muestran en la Figura 3.3.

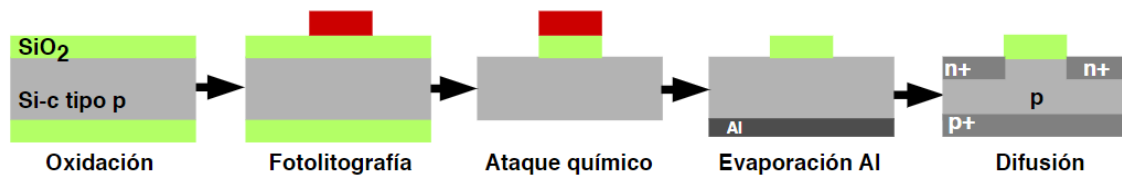


Figura 3.3. Pasos para la elaboración de las juntas localizadas.

Por un lado, para la difusión localizada de fósforo y obtener las juntas $n-p$, se emplea una máscara de SiO_2 . Para esto se requiere un proceso de oxidación de la oblea de Si, un proceso de fotolitografía y un ataque químico para remover parte del SiO_2 .

Por otro lado, la juntura $p/p+$ es común a todos los fotodiodos y se elabora mediante la difusión de aluminio en la cara posterior de la oblea. Para esto es necesario evaporar

una capa de aluminio de aproximadamente $1\ \mu\text{m}$ en la cara posterior de la oblea, que actúa como fuente de dopantes tipo p en el proceso de difusión. La difusión de fósforo y de aluminio para obtener la estructura $n^+/p/p^+$ ocurre de forma simultánea en un único proceso en el horno de difusión.

3.1.2.1. Crecimiento del SiO_2 de la máscara dura

Una de las propiedades más importantes del dióxido de silicio (SiO_2) es actuar como barrera de impurezas durante procesos de altas temperaturas. El coeficiente de difusión del boro y el fósforo, entre otros, en el silicio es varios órdenes de magnitud menor que en el dióxido de silicio. En consecuencia, al tener una máscara de SiO_2 sobre Si, se pueden obtener de forma simultánea en un proceso de difusión de dopantes, zonas difundidas donde el silicio está expuesto y zonas sin difundir en las regiones protegidas por la capa de SiO_2 .

La máscara de SiO_2 empleada para definir las áreas a difundir en el proceso de difusión localizada se conoce en la literatura máscara dura. En la Figura 3.4 se muestra el espesor requerido de SiO_2 para ser utilizado como máscara en procesos de difusión de fósforo, en función del tiempo y la temperatura. Para lograr una difusión localizada de fósforo, en un proceso de difusión estándar de 40 min a $900\ ^\circ\text{C}$, una máscara dura de 200 nm de espesor es suficiente.

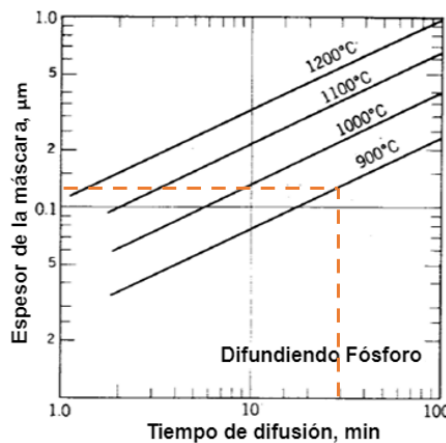


Figura 3.4. Espesor de máscara de SiO_2 necesario para evitar difusión de fósforo en función del tiempo y la temperatura. [4]

El crecimiento de SiO_2 en la superficie de la oblea de Si se realiza generalmente en ambiente de oxígeno o vapor de agua, o puede ser depositada mediante técnicas CVD o *sputtering*, siendo el crecimiento mediante oxidación térmica la técnica más adecuada para elaborar la barrera de difusión. Luego del proceso de oxidación, se definen las áreas de SiO_2 a remover mediante la técnica de fotolitografía y finalmente mediante un

proceso de ataque químico, que puede ser húmedo o seco, se remueve el SiO_2 sobrante y así quedan expuestas las zonas a difundir. A continuación, se describen las características y las facilidades existentes en CNEA para realizar cada uno de estos procesos.

Para el crecimiento mediante oxidación térmica de SiO_2 sobre silicio, se cuenta en el Laboratorio Fotovoltaico del DES con un horno de alta temperatura marca THERMCO (Figura 3.5). En este horno se puede hacer tanto oxidaciones húmedas en vapor de agua, como secas en ambiente de oxígeno. El horno cuenta con control de temperatura, se utilizan termocuplas en diferentes lugares del horno para medir la temperatura y se accionan las resistencias de calentamiento con un controlador lógico programable (PLC). La programación del proceso se realiza desde una interfaz de usuario en una PC, conectada al PLC mediante TCP/IP. Como se observa en el esquema en la Figura 3.5 (b), el horno este es de tipo horizontal y las obleas se colocan verticalmente en naves de cuarzo. Los gases empleados en la oxidación seca son nitrógeno y oxígeno.

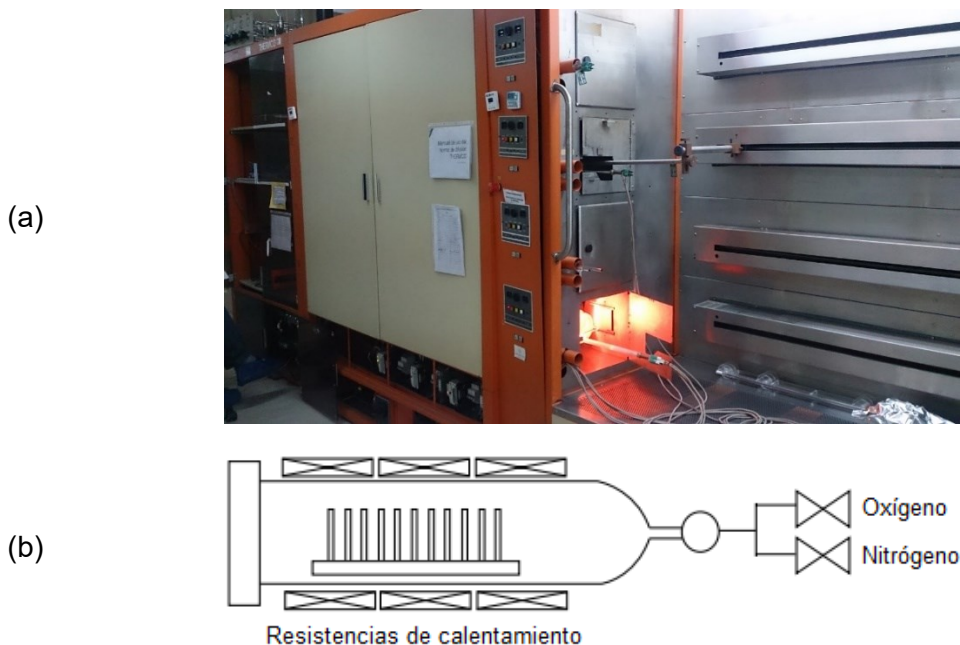


Figura 3.5. (a) Horno de alta temperatura THERMCO. (b) Esquema del horno.

El proceso de oxidación seca en el horno de alta temperatura se lleva a cabo en ambiente de oxígeno de alta pureza (99,999%) y tiene como resultado una capa de óxido que cubre toda la superficie de la oblea en ambas caras. Esta técnica ofrece un óxido de mayor densidad y calidad que el obtenido mediante oxidación húmeda y que el óxido depositado mediante *sputtering* [5]. Para la elaboración de la máscara dura en las obleas se hicieron crecimientos de SiO_2 de 270 y 400 nm de espesor. Los tiempos

de la oxidación se estimaron a partir del gráfico que se muestra en la Figura 3.6, donde están identificados en rojo los puntos de interés.

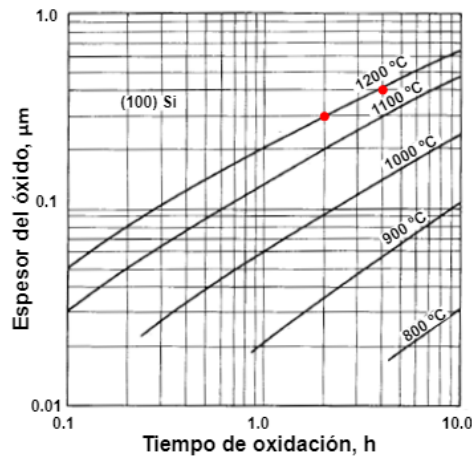


Figura 3.6. Tasa de crecimiento de SiO_2 en oxidación seca para obleas de Si con orientación (100), se destacan los puntos de la curva para 270 y 400 μm . [4]

En la Tabla 3.1 se muestran las etapas de la oxidación seca a las que se someten las obleas para obtener los espesores deseados de SiO_2 . El espesor de la capa de óxido se midió mediante elipsometría.

Tabla 3.1 Parámetros del proceso de oxidación seca.

Etapas	Descripción	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	N₂ (L/min)	O₂ (L/min)
1	Rampa inicial	700	50	2,0	0
2	Entrada	700	10	2,0	0
3	Rampa a 1190°C	1190	40	3,0	3,0
4	Oxidación	1190	240, espesor: 400 nm 120, espesor: 270 nm	0	6,0
5	Salida al final	700	60	3,0	0

3.1.2.2. Fotolitografía de la máscara dura

Luego de la oxidación se realiza un proceso de fotolitografía sobre la muestra para definir las áreas de SiO_2 que van a quedar protegidas durante el siguiente paso que es el ataque químico. Para transferir el patrón deseado se emplea una máscara que depende del tipo de detector a elaborar, las máscaras diseñadas se encuentran en el Anexo B.

Por otro lado, se define qué tipo de fotolitografía es necesario realizar, teniendo en cuenta la naturaleza del ataque químico al que se va a someter la muestra. Si se va a hacer un ataque seco, se puede hacer una fotolitografía estándar de 7 μm con fotorresina positiva AZ-9260 [6]. Si se va a hacer un ataque húmedo, es necesario hacer una capa más gruesa de la misma fotorresina que sea capaz de resistir el ataque, al duplicar el espesor de la fotorresina se cuadruplica el tiempo que resiste en un ataque húmedo. El proceso de fotolitografía estándar que se realiza en el Laboratorio Fotovoltaico se describe en la Figura 3.7.

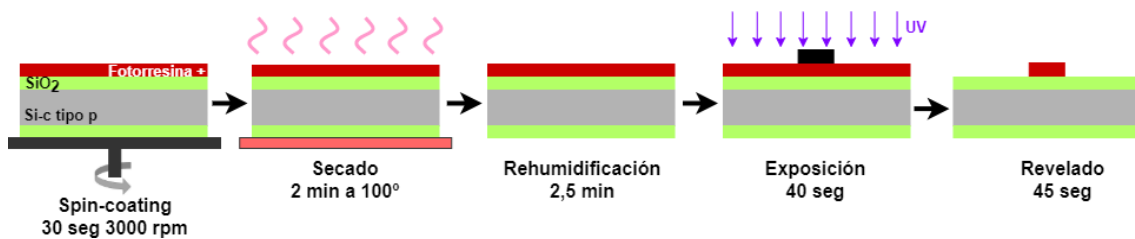


Figura 3.7. Proceso de fotolitografía.

Inicialmente, se vierte un poco de fotorresina sobre la oblea y se hace girar a velocidad controlada en una centrífuga (*spinner*), 30 s a 3000 rpm, para lograr una capa homogénea en toda la superficie. Luego se seca la muestra en un horno a 100 °C durante 2 min, donde se evaporan parte de los solventes. Para lograr una capa más homogénea se deja rehumidificar la muestra, para esto se coloca en un lugar protegido de la luz como mínimo 2,5 min. Una vez transcurrido el tiempo de rehumidificación se coloca la máscara sobre la oblea, se protege con un vidrio y se ilumina con una lámpara UV durante 40 s. Inmediatamente después de la exposición se pasa a revelar la muestra en una solución del revelador comercial AZ-100 (1 AZ-100: 3 H₂O DI) durante unos 45 segundos aproximadamente o hasta que se observe solamente el patrón deseado. La fotorresina empleada es positiva, lo que quiere decir que la parte que se ilumina se va a solubilizar en el revelador. Finalmente se enjuaga la muestra en agua DI y se seca con N₂. Una vez seca, se inspecciona la oblea con ayuda del microscopio óptico para verificar si el proceso de fotolitografía fue exitoso, en caso de presentar algún inconveniente se puede remover toda la fotorresina con acetona y volver a empezar el proceso.

Para lograr una capa gruesa de fotorresina con un espesor homogéneo, el fabricante recomienda hacer el depósito en varios pasos. Para los ataques húmedos realizados fue suficiente con dos pasos de depósito de fotorresina (Figura 3.8). Cada depósito se hace en el tiempo y velocidad estándar, seguido de un mayor tiempo de secado en el horno y a mayor temperatura que en el proceso de 7 μm , 3 min a 120 °C, y luego una

rehumidificación de 15 minutos como mínimo. Estas modificaciones son necesarias para que la fotorresina quede homogénea y lo suficientemente seca para que no se disuelva parcialmente en el siguiente paso de depósito de fotorresina, el resto de los pasos no se modifican. Hay que tener especial cuidado con la temperatura del horno, ya que a partir de los 140 °C las resinas positivas comienzan a experimentar *cross-link* térmico y disminuye considerablemente su solubilidad, lo que dificulta su remoción.

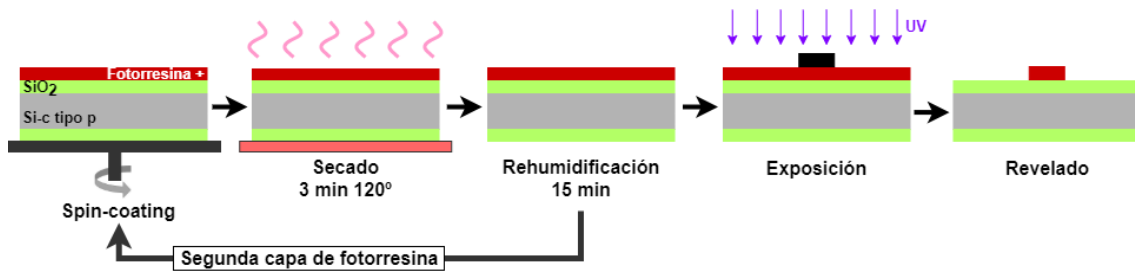


Figura 3.8. Fotolitografía para el ataque químico húmedo.

En la Figura 3.9 se observa la fotolitografía en dos pasos de una marca de alineación sobre SiO₂.

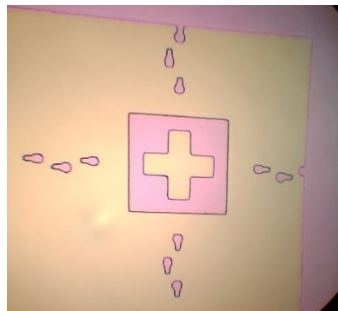


Figura 3.9. Marca de alineación definida con fotolitografía de dos pasos sobre SiO₂.

3.1.2.3. Ataque químico del SiO₂ de la máscara dura

Para remover la capa de SiO₂ que cubre las áreas que se desean difundir se somete la muestra a un ataque químico, este puede ser húmedo (en una solución), o puede ser seco (en un ambiente reactivo). En ambos casos lo importante es que sea un ataque selectivo, es decir que solo ataque la capa que se desea, sin modificar las otras.

El ácido fluorhídrico (HF) es el único medio húmedo donde el SiO₂ es isotrópicamente atacado a una tasa razonable. Para remover el óxido nativo es suficiente utilizar una solución de HF al 1%. Para remover espesores más gruesos se recomienda utilizar una solución de HF con fluoruro de amonio (NH₄F), típicamente identificada como *buffer* HF (BHF), ya que el consumo de iones flúor por la reacción de ataque es compensado por la ionización de NH₄F en amonio y flúor. El BHF permite que la tasa de ataque sea constante y controlable, así como un ataque espacialmente homogéneo. El SiO₂ crecido

por oxidación térmica seca tiene una tasa de ataque más lenta que los óxidos crecidos por oxidación húmeda, debido a que es menos poroso. Como el ataque se hace en la solución BHF, este se produce en ambas caras en simultáneo, lo cual puede ser una ventaja en algunos casos. Es una técnica económica, fiable y generalmente muy selectiva. Sin embargo, debido a que es un ataque isotrópico puede haber problemas en la definición de los patrones debido al socavado de la resina en los bordes. Los pasos para obtener la máscara de SiO₂ mediante ataque húmedo se muestran en la Figura 3.10. [7, 8]

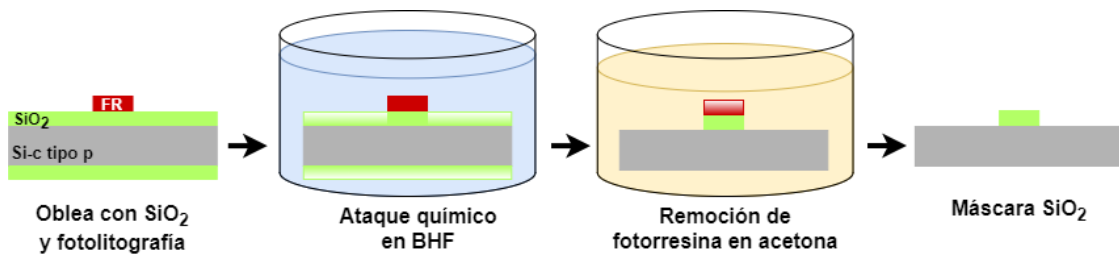


Figura 3.10. Pasos para transferir el patrón de la fotolitografía al SiO₂ mediante ataque químico húmedo.

En la Figura 3.11, se muestra una imagen tomada con el microscopio óptico de una muestra luego de un ataque en BHF, antes y después de remover la fotorresina, se observa el socavado de los bordes de la fotorresina y el patrón en los bordes de la zona de SiO₂ es típico de los ataques isotrópicos.

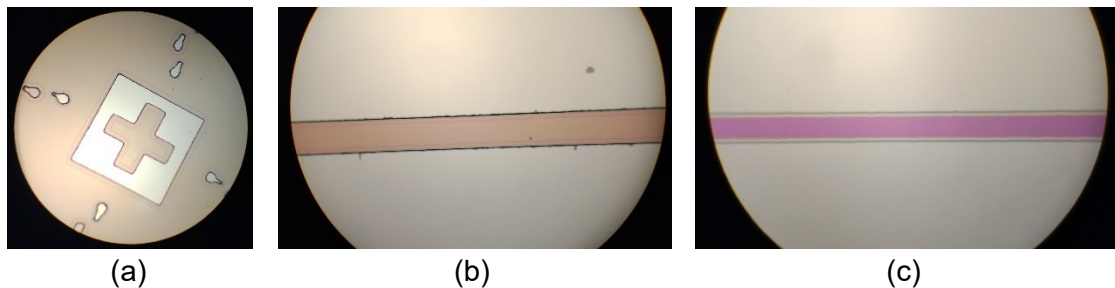


Figura 3.11. Transferencia del patrón definido con fotolitografía al SiO₂ mediante ataque químico húmedo, (a) y (b) antes de remover la fotorresina, (c) luego de remover la fotorresina.

En este trabajo se hicieron máscaras duras de SiO₂ de 270 y 400 nm de espesor. Los resultados del ataque químico húmedo a obleas con SiO₂ de 270 nm (Figura 3.12) fueron satisfactorios, y el tiempo de ataque en BHF fue de aproximadamente 5 min. La máscara dura de las muestras con 400 nm de espesor de óxido no se logró realizar mediante ataque químico húmedo en solución BHF. En este proceso, la fotorresina no resistió el tiempo de ataque necesario para remover todo el óxido de las áreas a difundir, que fue alrededor de 12 minutos.

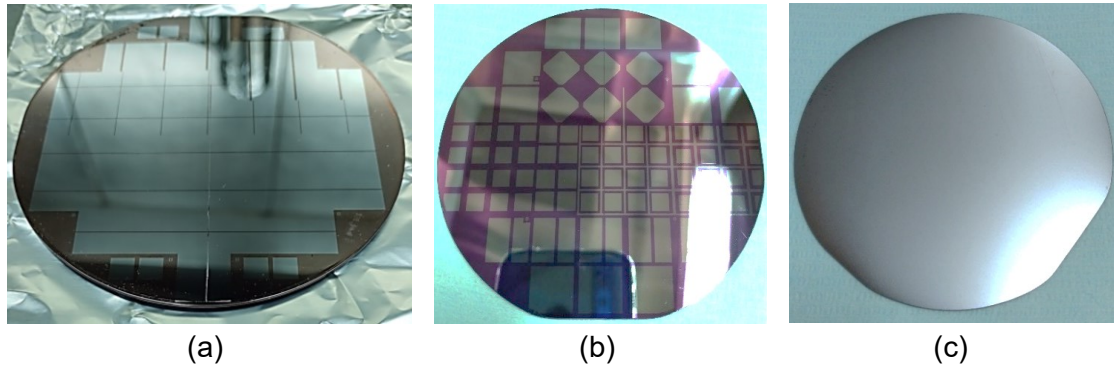


Figura 3.12. Ataque químico húmedo a SiO_2 de 270 nm, cara frontal y cara posterior.

Como resultado, se decidió cambiar el tipo de ataque para el óxido de 400 nm y pasar a realizar un ataque seco, que consiste en la remoción de material de la superficie del sustrato utilizando mecanismos de ataque físicos, químicos o una combinación de ambos. El ataque físico remueve los átomos de la superficie del sustrato mediante un bombardeo de iones con alta energía cinética, el material removido se evapora luego de dejar el sustrato. En este proceso no se produce ninguna reacción química y, por tanto, solo se elimina el material desenmascarado. Por otro lado, el ataque químico seco (también llamado ataque en fase de vapor) implica una reacción química entre los gases de ataque y el sustrato, los productos de la reacción se eliminan como gases de escape; este proceso no utiliza productos químicos o atacantes líquidos. [9]

El ataque con iones reactivos (RIE, por sus siglas en inglés) es una forma de ataque con plasma que proporciona un alto nivel de resolución al utilizar ambos mecanismos de ataque, reacción química y acción física (Figura 3.13). Este es uno de los procesos más diversos y utilizados en la industria de semiconductores. Se realiza en una cámara de vacío con gases reactivos excitados por un campo magnético (Figura 3.14). A diferencia de la mayoría de los ataques químicos húmedos, el proceso de ataque seco mediante RIE suele ser anisotrópico y presenta una alta selectividad, por lo que se pueden transferir patrones pequeños con menor socavado y mayor relación de aspecto que en el ataque húmedo. [7, 9]

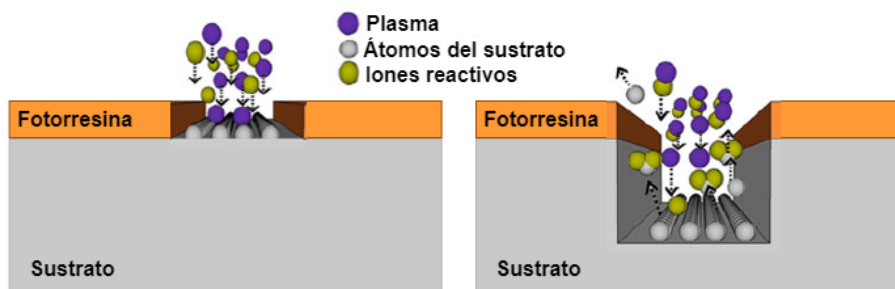


Figura 3.13. Proceso RIE, reacciones químicas y acciones físicas.

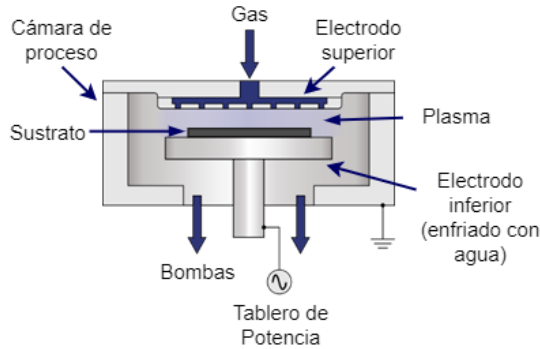


Figura 3.14. Configuración típica de RIE.

En el ataque seco de SiO_2 mediante RIE se utilizan comúnmente como gas reactivo los compuestos de perfluorocarbono (PFC). Se pueden agregar otros gases como O_2 , Ar y He para mejorar la transferencia de calor, la estabilización del plasma y la ionización. Para lograr una mejor selectividad y precisión en el ataque se usa el octafluorociclobutano (C_4F_8) como gas reactivo, en lugar del CF_4 convencional, porque se cree que la relación C/F relativamente alta de C_4F_8 induce la formación de una película C:F sobre Si o SiN que actúa como una barrera de ataque, mejorando así la selectividad. Se cree que la adición de O_2 es útil para controlar el grado de polimerización superficial y la selectividad del ataque. [10]

El DMNT de la CNEA cuenta con un equipo RIE Plasmalab 80 Plus de la marca Oxford Instruments para realizar ataques secos (Figura 3.15). El equipo se controla desde una PC con un programa del propio fabricante, también ofrece la posibilidad de crear, almacenar y cargar recetas de procesos, así como monitorearlo.



Figura 3.15. RIE Plasmalab 80 Plus de Oxford Instruments, Sala Limpia del DMNT.

En el ataque mediante RIE, a diferencia del ataque húmedo, se remueve solamente el óxido de la cara que queda expuesta de la oblea, la otra cara queda protegida por el electrodo inferior de la cámara. Es por esta razón que son necesarios dos procesos de RIE para eliminar el óxido de la cara frontal y la cara posterior, como se muestra en la

Figura 3.16. El área efectiva de ataque no cubre toda la superficie de una cara de la oblea y no es homogéneo en la totalidad de la superficie expuesta. En el área efectiva de ataque la remoción es óptima y el perfil es un escalón, a diferencia del perfil suave (con socavado de la resina) del ataque húmedo. Es un compromiso entre los distintos factores. Cabe destacar que es un proceso que requiere de insumos costosos y de difícil acceso.

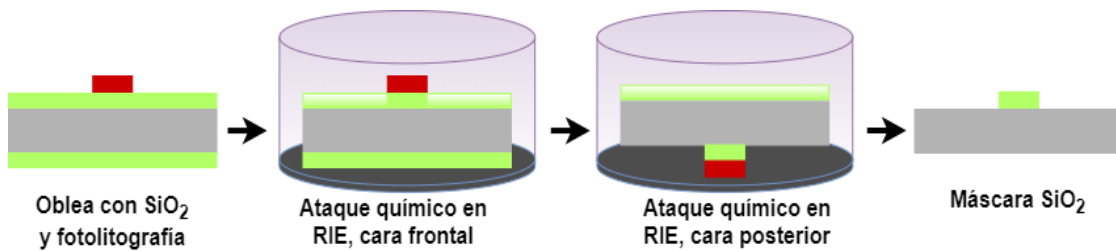


Figura 3.16. Pasos para remover el SiO₂ de la oblea mediante RIE.

En los primeros ataques que se realizaron en el RIE no se obtuvieron resultados favorables. Se observó un patrón en la oblea coherente con el depósito de una película de fluorocarbono, que frenó el ataque del SiO₂ (Figura 3.17), típico de otros procesos de RIE. Luego de varias pruebas, se concluyó que esto se debió a una saturación de helio (He) en la cámara, que se utiliza como gas refrigerante, provocado por el tamaño de las muestras, que no permitió hacer un ajuste adecuado del sustrato a la base de la cámara. Para evitar este problema, se tomó la decisión de eliminar el enfriamiento con He y los resultados fueron satisfactorios; con el único inconveniente de que la fotorresina sufrió un sobrecalentamiento y fue necesario un proceso posterior en plasma de oxígeno para remover la fotorresina. Cabe aclarar que el plasma de oxígeno se utiliza para atacar residuos orgánicos.

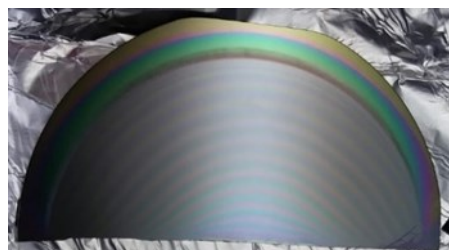


Figura 3.17. Cara posterior de una muestra con el depósito de fluorocarbono que frenó el ataque al SiO₂.

La conclusión de las primeras experiencias con el RIE es que lo más aconsejable es trabajar con obleas enteras, en lugar de muestras chicas. En la Figura 3.18, se observa el antes y después del ataque en el RIE a una oblea entera con estructuras de prueba

para los sensores finos, donde el ataque fue exitoso. El tiempo de ataque fue entre 10 y 12 min en cada cara, sin refrigeración con He.

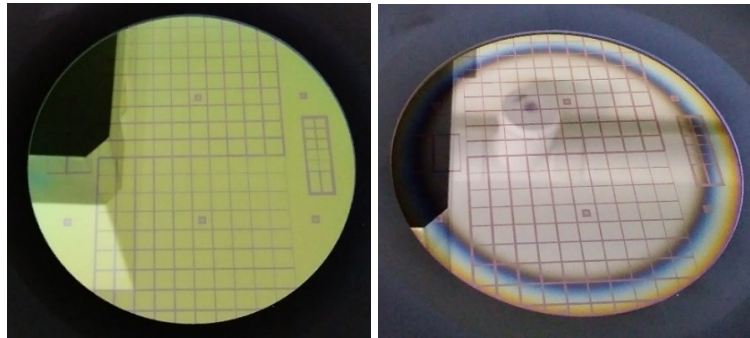


Figura 3.18. Oblea con estructuras de prueba antes y después del ataque en el RIE.

3.1.2.4. Evaporación de aluminio

En el paso previo a la difusión de dopantes, se realiza el depósito de una capa de aluminio en la cara posterior de la oblea, la cual sirve de fuente de dopantes tipo p para la formación de la juntura $p/p+$, que es común a todos los dispositivos. El depósito de aluminio se realiza mediante evaporación por efecto Joule en cámara de vacío. Para esto se cuenta en el Laboratorio Fotovoltaico con una evaporadora marca Leybold-Heraeus (Figura 3.19). Se evaporaron 2 g de Al de alta pureza (99,998%) para obtener un depósito de aproximadamente $1 \mu\text{m}$ de espesor, Figura 3.20.



Figura 3.19. Evaporadora marca Leybold-Heraeus modelo Univex 300.

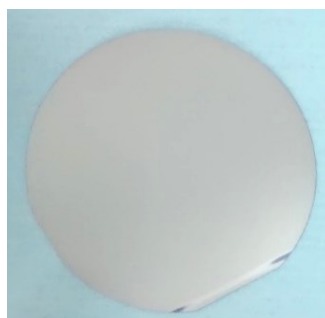


Figura 3.20. Cara posterior con Al evaporado antes de la difusión.

3.1.2.5. Difusión de dopantes: Formación de la juntura n+/p/p+

La estructura interna de los fotodiodos a elaborar consiste en una doble juntura n+/p/p+. Las junturas se obtienen variando la concentración de dopantes en cada una de las caras de la oblea. Por un lado, en la cara frontal la variación de impurezas debe ser de forma localizada para cada fotodiodo mientras que la capa p+ en la cara posterior es común a todos los dispositivos. Las impurezas que se emplean para dopar el silicio tipo p son aluminio, boro, galio e indio, de estos el más utilizado es el boro ya que el aluminio no puede ser enmascarado por el SiO₂, las impurezas tipo n son antimonio, arsénico y fósforo, siendo este último el más utilizado [4].

La variación de forma localizada de la concentración de dopantes se puede realizar mediante difusión e implantación iónica. En el caso de la difusión existen tres tipos de fuentes de impurezas: gaseosa, sólida o líquida. En esta última, un gas de arrastre se burbujea en la fuente líquida y se lleva en forma de vapor a la superficie de las muestras. El proceso de dopaje se inicia y/o termina controlando el gas que pasa por la fuente líquida y la cantidad de dopante arrastrada por el gas se controla ajustando la temperatura del baño [4].

En este trabajo, la formación de la juntura n+/p se realizó mediante difusión de fósforo a partir de una fuente líquida de POCl₃, siguiendo la receta estándar de difusión del Laboratorio Fotovoltaico [60, 69]. Mientras que la formación de la juntura p/p+ se realizó mediante una fuente sólida, que es la capa de aluminio depositada en la cara posterior de la oblea.

El proceso de difusión de fósforo tiene que ser controlado para que el dopante penetre en el sólido hasta obtener el espesor de emisor deseado. El horno Thermco de tubo abierto del Laboratorio Fotovoltaico, Figura 3.5, cuenta con una boca donde se realizan exclusivamente procesos de difusión de dopantes. En este proceso, además de controlar la temperatura, se controla el flujo de gases. Para esto se utilizan válvulas electromecánicas accionadas desde el PLC. En la Figura 3.21, se muestra un esquema del sistema, por un extremo del tubo se ingresa el flujo de gases y por el otro se introducen las muestras en una nave de cuarzo.

Este proceso consta de varias etapas, entre las que se destacan la predeposición, redistribución y recocido o *drive in*. En la predeposición, una cantidad conocida de dopantes se introducen en la oblea; durante la redistribución, el fósforo se distribuye en la superficie de la oblea; y durante el *drive-in*, las impurezas difunden más profundo [7].

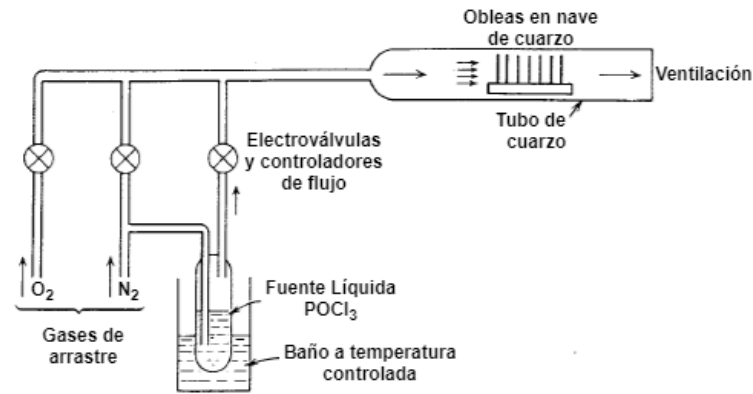
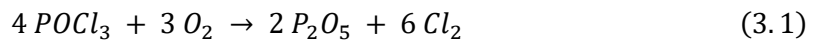
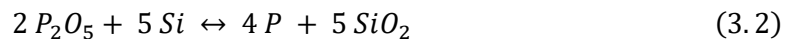


Figura 3.21. Sistema de difusión de P mediante fuente líquida de $POCl_3$.

Durante la predeposición, se burbujea N_2 en la fuente líquida de $POCl_3$, la cual se encuentra a una temperatura controlada de $24^\circ C$, y se utiliza O_2 para dar lugar a la formación de un gas oxidante, el P_2O_5 . La reacción química que se produce es la siguiente:



Luego, la reacción en la superficie de la oblea de Si es:



El fósforo proveniente de esta reacción es el que servirá de dopante tipo n en las obleas tipo p . El proceso de difusión se realiza a alta temperatura, generalmente entre 800 y $1000^\circ C$ en ambiente de N_2 y O_2 en proporciones adecuadas, en la Tabla 3.2 se muestran los valores de proceso que se emplearon en esta Tesis.

Tabla 3.2. Pasos y valores de proceso de difusión a partir de fuente líquida $POCl_3$.

Etapas	Temperatura ($^\circ C$)	$N_2 + POCl_3$ (L/min)	N_2 (L/min)	O_2 (L/min)	Tiempo (min)
Predeposición de P	890	0,8	0,5	7	5
Redistribución en N_2	890	-	7	0,5	5
Oxidación	890	-	0,5	7	15
Recocido (Drive in)	890	-	5	0,5	15

Los procesos de difusión de P y Al para la elaboración de la juntura $n+/p/p+$ ocurren de forma simultánea en un mismo proceso en el horno de difusión. En la Figura 3.22 se muestra la cara posterior de la oblea, luego del proceso de difusión de aluminio. Debido a la capa $p+$ se crea un campo de acción superficial (BSF, por sus siglas en inglés), el cual mejora la respuesta del dispositivo. Las pérdidas por recombinación de los electrones en el contacto posterior se reducen con el BSF. Esta zona de carga espacial se comporta como una capa pasivante para los defectos en la interfaz del contacto

posterior y permite mayor densidad de portadores de carga minoritarios en el volumen tipo p del dispositivo. [12].

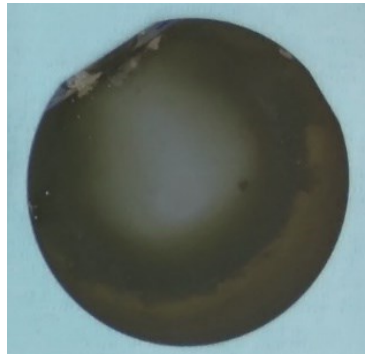


Figura 3.22. Cara posterior después de la difusión.

3.1.2.6. Medición de resistencia de capa

Para caracterizar cada proceso de difusión de fósforo se mide la resistencia de capa en obleas testigo, las cuales no tienen depósito de aluminio. La resistencia de capa está relacionada con la concentración de fósforo eléctricamente activo presente en la oblea y se calcula según la Ec. 3.3, donde R es la resistividad medida con la técnica de cuatro puntas equiespaciadas. La resistividad se midió con una sonda de cuatro puntas del fabricante LucasLab y un LR2000 Miliohmeter, el arreglo de medición se muestra en la Figura 3.23.

$$R_c = \frac{\pi}{\ln 2} * R \left[\frac{\Omega}{\square} \right] \quad (3.3)$$



Figura 3.23. Equipamiento para la medición de resistencia de capa.

En la Tabla 3.3 se muestran los valores obtenidos de resistividad en los distintos procesos de difusión realizados.

Tabla 3.3. Resistencia de capa de las difusiones realizadas.

Difusión	375	377	387	389
R (Ω)	14	12,5	4	3,7
R_c ($\frac{\Omega}{\square}$)	63,4	56,6	18	16,8

3.1.3. Elaboración de los contactos metálicos

Los contactos metálicos de un fotodiodo deben ser óhmicos, tener baja resistencia de contacto con el sustrato, tener una baja resistencia serie y antes de proceder con la metalización hay que tener en cuenta los requisitos del dispositivo a elaborar. El contacto posterior es común a todos los dispositivos y cubre completamente la cara posterior p+. Para el contacto de la cara frontal, hay que considerar que el área activa o fotosensible de los fotodiodos debe quedar expuesta. Además, cuando se elabora un arreglo de fotodiodos los contactos frontales deben estar perfectamente alineados con su respectiva área activa, es decir, con los pasos previos de la fabricación.

Los pasos para la elaboración de los contactos son: primero, realizar un proceso de fotolitografía con alineación de la capa de SiO₂; luego, depositar los contactos metálicos; seguidamente se realiza un lift-off para remover el sobrante de material y que quede metal depositado solamente en las zonas que no estaban protegidas por la fotorresina como se muestra en el esquema de la Figura 3.24; finalmente se realiza un recocido de contactos.

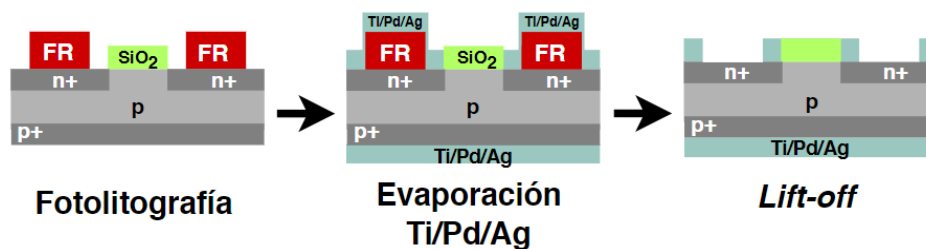


Figura 3.24. Pasos para obtener el patrón de contactos deseado.

El área donde van los contactos metálicos se define mediante fotolitografía de 7 μm con fotorresina positiva AZ-9260. Este proceso se realiza siguiendo los mismos pasos que se explicaron anteriormente en el primer paso de fotolitografía de 7 μm , Figura 3.7, con la única diferencia que antes de exponer la fotorresina es necesario alinear de la máscara con el sustrato, para que los contactos queden correctamente ubicados. Este proceso de fotolitografía se realiza en la Sala Limpia del DMNT, donde se encuentra el equipo EVG-620, Figura 3.25(a), que permite la alineación de la máscara y posterior iluminación de la fotorresina. Para la fotolitografía se emplean máscaras de contactos previamente diseñadas e impresas, específicas para cada tipo de detector a elaborar (Anexo B). En las máscaras se colocan marcas de alineación para poder alinear una capa de proceso con la siguiente como se observa en la Figura 3.25(b) y (c), durante la alineación y posterior inspección de la fotolitografía. En la Figura 3.26 se observa una oblea luego de la fotolitografía de contactos.

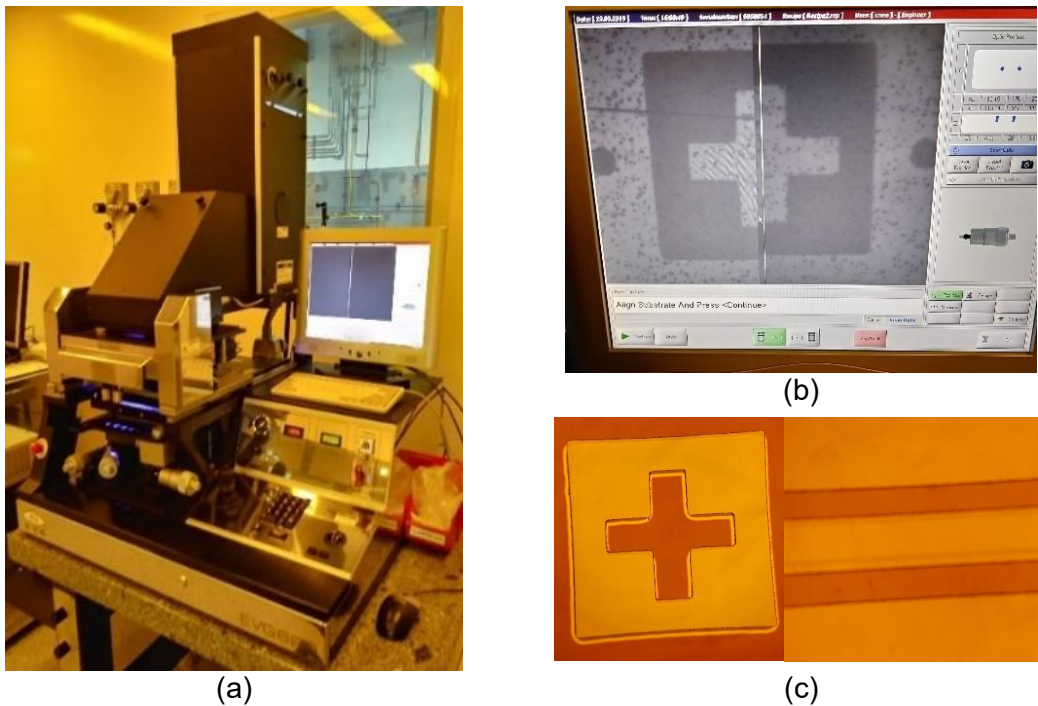


Figura 3.25. (a) Alineadora de máscaras EVG-620, (b) alineación de la máscara con el sustrato, (c) inspección de la fotolitografía de contactos y las marcas de alineación con el SiO₂ en el microscopio óptico.

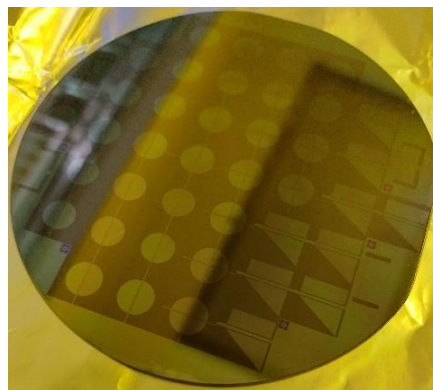
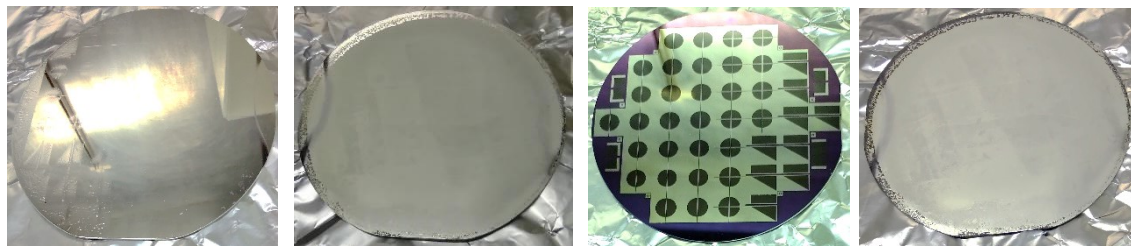


Figura 3.26. Fotolitografía de contactos con alineación.

Luego de la fotolitografía y previo al depósito de los metales, se realiza un ataque químico a la muestra con solución BHF para remover la capa de óxido de silicio dopado con fósforo (PSG) que se crea durante el proceso de difusión, de no ser eliminado, el PSG actúa como aislante entre la capa n^+ y los contactos.

Los contactos están formados por una multicapa de titanio (Ti), paladio (Pd) y plata (Ag), depositados en ese orden. Cada capa se deposita mediante evaporación térmica en cámara de vacío, sin romper el vacío entre los depósitos, en la evaporadora Leybold-Heraeus (Figura 3.19). Como la metalización se hace sobre toda la superficie expuesta

de la oblea, Figura 3.27(a) y (b), es necesario remover la fotorresina que queda debajo del metal depositado. Este proceso, denominado *lift-off*, consiste en un ataque con acetona, que disuelve la fotorresina y remueve el excedente de metal depositado encima de la fotorresina, dejando expuestas las áreas activas de los fotodiodos como se muestra en la Figura 3.27(c). Una vez finalizado el *lift-off*, la muestra se limpia primero con isopropanol y luego con H₂O DI.



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 3.27. Ambas caras de una oblea, (a) y (b) después de la evaporación de contactos y (c) y (d) después del *lift-off*.

El último paso de la elaboración de los contactos es un recocido a 400°C durante 20 min en la misma boca del horno donde se realizó la oxidación, en un ambiente de 4% de H₂ y 96 % de N₂ (*forming gas*). En este paso se realiza el sinterizado de los metales para obtener un buen contacto óhmico entre el metal y el semiconductor, además actúa como pasivante de la superficie [60]. En la Figura 3.28 se muestran los contactos y la separación entre fotodiodos de un detector después del proceso de recocido de contactos.



Figura 3.28. Contactos de cada fotodiodo y barrera de SiO₂ de un detector.

3.1.4. Corte de la oblea de silicio

El corte de las obleas se hace en una sierra automatizada de la marca DISCO modelo DAD3240 con alineación óptica, enfriada por agua, que se encuentra en el DMNT, que se presenta en la Figura 3.29(a) y (b). La máscara de fotolitografía tiene en cuenta el ancho del corte (35 μm) para obtener dispositivos del tamaño esperado. Una vez cortados, los dispositivos se despegan del soporte con luz UV, Figura 3.29(c).

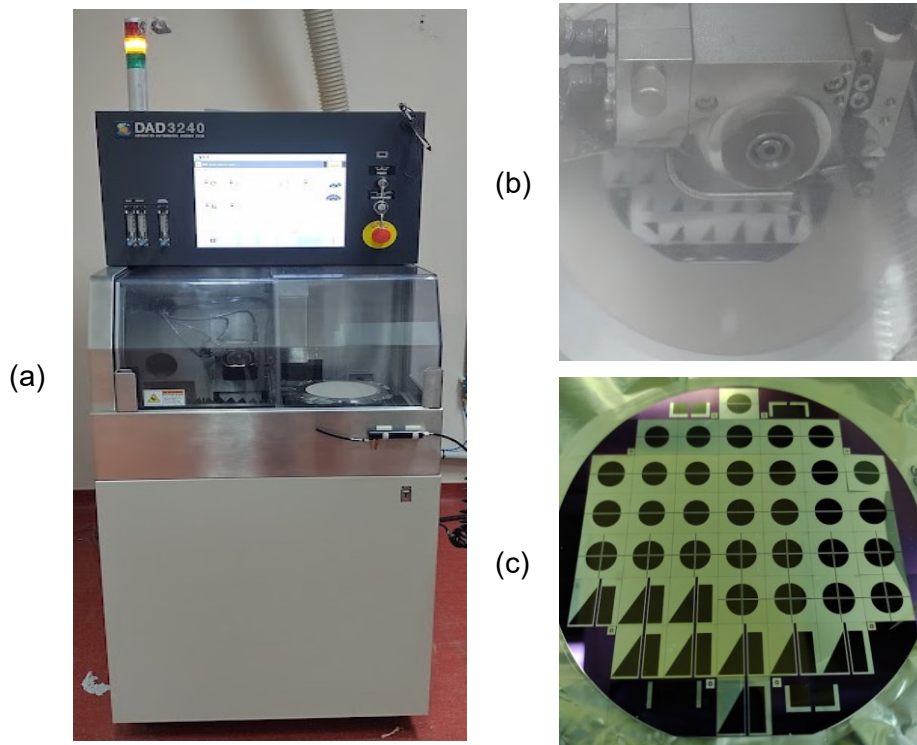


Figura 3.29. Sierra de corte con alineación óptica.

En la Figura 3.30 se observan diferentes detectores elaborados y cortados, que responden a los diseños planteados en el Capítulo 2.

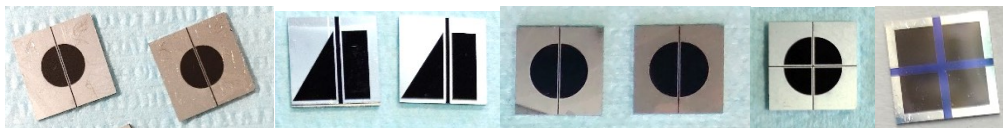


Figura 3.30. Detectores elaborados con diferentes diseños y áreas activas.

3.2. Elaboración de la ventana

La parte óptica de los sensores consiste en una ventana formada por una capa metálica que limita el paso de la luz, depositada sobre un sustrato de vidrio que sirve para separar la ventana del detector. Para la elaboración de la ventana se utilizaron como sustrato láminas portaobjetos de vidrio sódico-cálcico de la tercera clase hidrolítica, de aproximadamente 76 mm x 26 mm y 1 mm (tol. $\pm 0,05$ mm) de espesor, del fabricante Marienfield [13].

Dado que la ventana tiene que estar alineada con el detector, es necesario obtener una ventana centrada en un vidrio de tamaño conocido, 12 mm x 12 mm, y que el proceso de elaboración sea reproducible. Para la elaboración de la ventana se definieron los pasos que se muestran en la Figura 3.31. Inicialmente se hace un marcado o 1^{er} corte de 0,5 mm de profundidad de la oblea de vidrio. Como segundo paso, se acondiciona la

muestra para favorecer la adhesión del metal mediante limpiezas orgánicas e inorgánicas. Luego, para transferir el diseño de la ventana al vidrio se siguen los mismos pasos que para la elaboración de contactos de los detectores: fotolitografía con alineación, evaporación de metales y *lift-off*. Finalmente, se separan las muestras mediante el clivado del vidrio por las zonas pre-cortadas.



Figura 3.31. Pasos de la elaboración de la ventana.

El primer paso del marcado del vidrio, se planteó para abordar los siguientes problemas: en primer lugar, la sierra de corte del DMNT no está diseñada para cortar substratos de vidrio con el espesor requerido; en segundo lugar, el marcado con lápiz de diamante y el clivado del vidrio pueden deteriorar la capa metálica y no proporcionan una definición ni repetibilidad adecuadas de los bordes de la muestra, lo cual dificulta la alineación con el detector; en tercer lugar, al utilizar la sierra de corte del DES para cortar las muestras al final del proceso de fabricación, al no contar con alineación óptica, se dificulta la correcta alineación del corte con los bordes de la metalización de la ventana, lo que puede derivar en errores de alineación entre la ventana y el detector.

En la Figura 3.32 se muestra una imagen de la sierra de corte del DES. A la cual, en el marco de este trabajo, se le realizaron varias mejoras, como son un nuevo soporte para sujetar la sierra y así disminuir las vibraciones y mejorar la definición del corte, y un nuevo soporte para sujetar las muestras con vacío en lugar de pegarlas con cera.

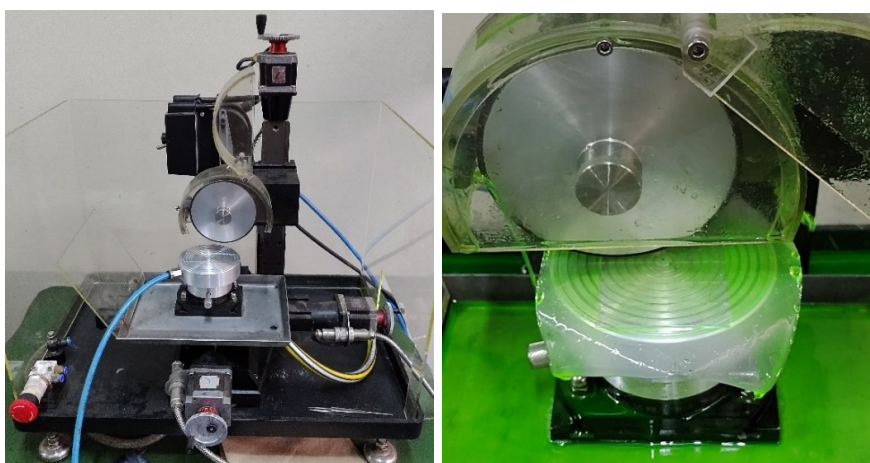


Figura 3.32. Sierra de corte con modificaciones (izquierda) y durante el corte del vidrio (derecha).

El corte se programa desde una PC con un programa del fabricante, donde se especifica el tamaño de la muestra y los parámetros de profundidad del corte (*Depth*), el ancho que se debe considerar del corte (*Cut width*), la cantidad de cortes a realizar (*Slices*) y separación entre cortes (*Kerf*). Los valores programados se detallan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Parámetros para para programar el corte.

Parámetros	Corte inicial, alineación	Restantes cortes
Cortes	1	6
Ancho	0,5 mm	0,5 mm
Profundidad	0,5 mm	0,5 mm
Separación	0 mm	12 mm

Luego del marcado del vidrio con la sierra, se realizó una limpieza orgánica e inorgánica a los substratos de vidrio siguiendo los pasos de la Figura 3.2 para mejorar la adherencia del metal. Una vez limpia la muestra, se realizó una fotolitografía para definir la posición de la abertura de la ventana, siguiendo los pasos de la Figura 3.7. La fotolitografía se realizó sobre la cara del vidrio sin cortes. Las diferencias entre los diseños propuestos de la ventana son la geometría, el tamaño y la ubicación de la apertura, lo que implica el empleo de una máscara de fotolitografía específica para cada diseño (Anexo B). Las líneas de corte del substrato se utilizaron como marcas de alineación en el proceso de fotolitografía, como se muestra en la Figura 3.33.

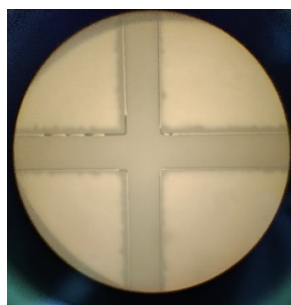


Figura 3.33. a) Alineación de la fotolitografía con el marcado del vidrio.

Para la capa metálica se realizaron depósitos de aluminio y de Ti/Pd/Ag. Se utilizaron estos metales por la facilidad de hacerlo en el Laboratorio Fotovoltaico, durante los procesos de evaporación mencionados previamente para el detector. Posteriormente, se realiza el proceso de *lift-off* para remover el metal y la fotorresina que protege la apertura de la ventana, Figura 3.34. Finalmente, se separan las ventanas de 12 mm x 12 mm mediante el clivado del vidrio por las zonas pre-cortadas. El clivado del vidrio deja un escalón en el borde de la ventana, que sirve para la alineación con el detector y de encastre en el soporte del sensor.

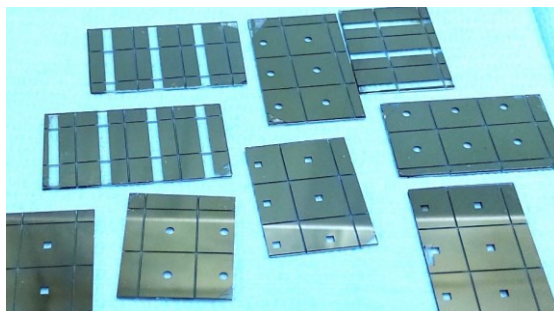


Figura 3.34. Ventanas metalizadas después del lift-off.

En total, se elaboraron ventanas con geometría circular de 1 mm de radio y cuadradas de 1,8 mm de lado para los detectores de dos y cuatro cuadrantes; así como rectangulares de 2 mm de ancho para los fotodiodos triangulares. El principal resultado es que se observó una mejor adherencia al vidrio con la multicapa metálica que con el depósito de aluminio. Como recomendaciones para el trabajo futuro se propone utilizar cromo o níquel para la metalización del vidrio.

3.3. Integración del sensor

Los sensores diseñados requieren de una base o soporte para ensamblar el conjunto detector y ventana. El principal requisito del soporte es que tiene que garantizar la correcta alineación entre los componentes, que no obstruya el campo de visión de los sensores y que al detector solo llegue la luz que pasa por la ventana. El primer prototipo de la base se pensó para ser utilizado durante la caracterización de los dispositivos. Para utilizar el mismo soporte para caracterizar varios detectores y ventanas, se diseñó un soporte que integre los componentes sin necesidad de pegado del detector ni el vidrio. Además, se consideraron alternativas para evitar realizar soldaduras en el detector que puedan afectar la planitud del detector y el vidrio.

Para cumplir con los requisitos planteados, se diseñó y torneó un soporte en plástico de 30 mm de lado como el que se muestra en la Figura 3.35. En un primer nivel, se hizo un cuadrado de 12 mm x 12 mm donde encastra el detector, y en un segundo nivel de 13,5 mm x 13,5 mm, a 600 μm de altura, se encastra el vidrio. Como este soporte se diseñó para caracterizar el detector se tuvo en cuenta durante el diseño que el detector quede a la misma altura que la celda de referencia para calibrar el simulador solar. El soporte se diseñó con 5 salidas, para poder ser utilizado con detectores de tres y cinco terminales. La tapa se ajusta con tornillos para presionar el vidrio y que contacte con el detector, además encastra en las ranuras de las salidas para evitar que entre luz por esas aberturas. La abertura en la tapa es cuadrada, de 11 mm de lado y 1,5 mm de espesor.

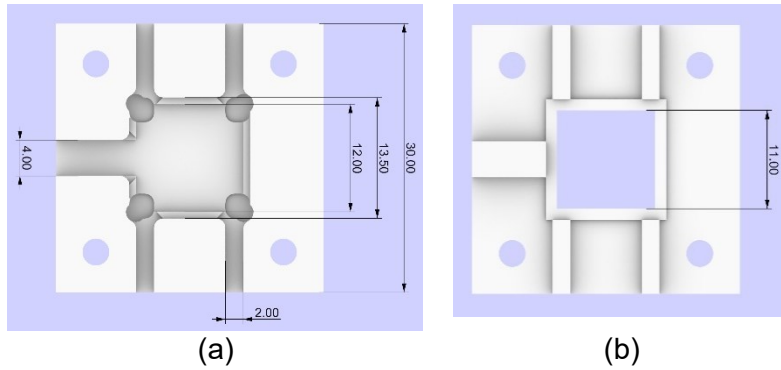


Figura 3.35. Diseño del soporte del sensor para caracterización: (a) base y (b) tapa.

Para contactar los fotodiodos y los cables de medición se utilizaron cintas de cobre, que se pegaron a la cara interior del vidrio y a la base del soporte. Los cables de medición para los contactos superiores se pegaron a la base para facilitar el montaje de los componentes. En la Figura 3.36 se observa el prototipo elaborado y los pasos para integrar los componentes en el soporte. Se puede apreciar la versatilidad del soporte para ser utilizado durante la caracterización de los dispositivos.

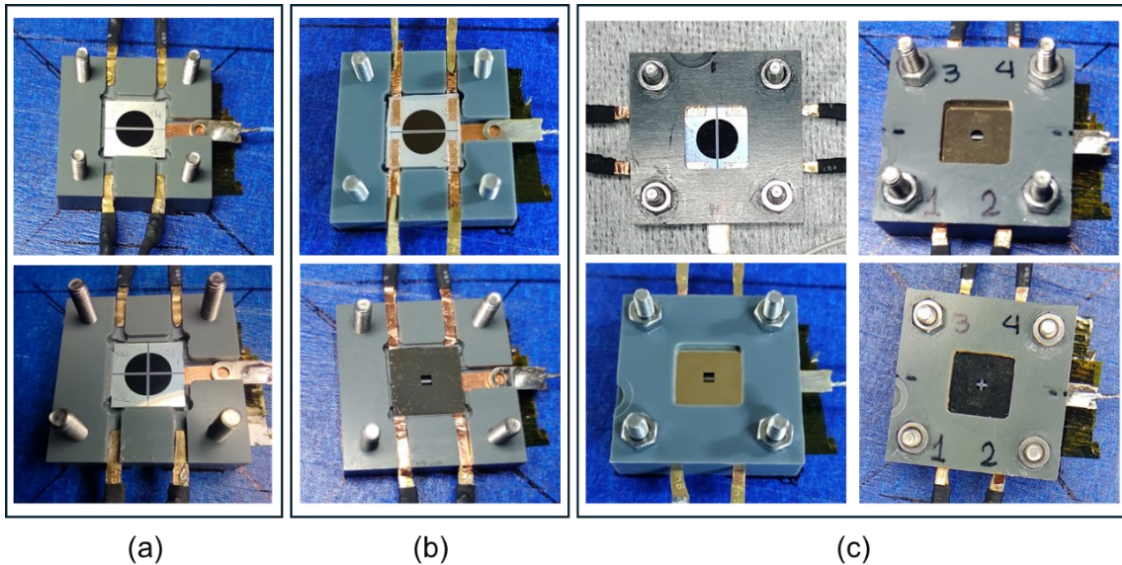


Figura 3.36. Integración en el soporte de caracterización: (a) colocación del detector, (b) colocación del vidrio o la ventana, (c) colocación y ajuste de la tapa.

3.4. Conclusiones

Se elaboraron los diferentes diseños propuestos del detector y la ventana, así como estructuras de prueba y el soporte del sensor. Se pusieron a punto las técnicas de elaboración de juntas localizadas y se reacondicionó la sierra de corte con la que cuenta el DES.

Las conclusiones a las que se arribaron en el proceso de fabricación del detector son que los mejores resultados en la definición de la máscara dura se obtuvieron con un

espesor del SiO₂ de 270 nm, con un depósito de fotorresina en dos pasos y con ataque químico húmedo en solución BHF.

Con respecto a la elaboración de la ventana, se introdujeron modificaciones en el proceso tradicional de elaboración de dispositivos: se optó por realizar un marcado profundo del vidrio como primer paso del proceso de elaboración. Se concluyó que la multicapa Ti/Pd/Ag presenta una mejor adherencia al vidrio con que el depósito de aluminio. Como recomendaciones para el trabajo futuro se propone utilizar cromo o níquel para la metalización del vidrio.

El soporte plástico elaborado facilitará la caracterización eléctrica de los dispositivos ya que el diseño propuesto permite un ensamble simple y rápido de los sensores. En este sentido, las líneas de trabajo futuro son: realizar pruebas de soldadura para obtener contactos que no afecten la planitud y alineación de los componentes y fabricar un soporte de aluminio que considere las soldaduras de los contactos y el pegado del vidrio.

Referencias

- [1] M. Martínez Bogado, M. Tamasi, C. Bolzi y D. Raggio, «Desarrollo de sensores solares en argentina, aplicaciones terrestres y espaciales,» *Revista Brasileira de Energia Solar*, vol. 6, nº 1, 2017.
- [2] M. J. Tamasi, «Celdas Solares para Uso Espacial: Optimización de Procesos y Caracterización,» 2003.
- [3] R. C. Jaeger, *Introduction to Microelectronic Fabrication*, vol. 5, Prentice Hall, 2002.
- [4] S. K. Ghandhi, *VLSI Fabrication Principles: Silicon and Gallium Arsenide*, 2nd Edition, Wiley, 1994.
- [5] R. C. Jaeger, *Introduction to Microelectronic Fabrication*., vol. Modular Series on Solid State Devices, Prentice Hall, 2002.
- [6] Microchemicals GmbH, «https://www.microchemicals.com/micro/tds_az_9200_series.pdf,» [En línea].
- [7] S. Franssila, *Introduction to Microfabrication: Second Edition*, John Wiley & Sons, 2010.
- [8] MicroChemicals GmbH, «https://www.microchemicals.com/technical_information/silicon_etching.pdf,» [En línea].

- [9] S. B. Inayat, A. P. Nayak, V. J. Logeeswaran y M. S. Islam, «Dry Etching Processes,» de *Encyclopedia of Nanotechnology*, B. Bhushan, Ed., Dordrecht, Springer Netherlands, 2012, pp. 587-589.
- [10] A. Sankaran y M. J. Kushner, «Etching of porous and solid SiO₂ in Ar/C₄F₈, O₂/C₄F₈ and Ar/O₂/C₄F₈,» *Journal of Applied Physics* 97, 023307 (2005); doi: , vol. 97, nº 2, p. 023307, 2005.
- [11] P. A. Basore, J. M. Gee, M. Buck, W. Schubert y D. S. Ruby, «Simplified high-efficiency silicon cell processing,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 34, nº 1, pp. 91-100, 1994.
- [12] A. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R. van Swaaij y M. Zeman, *Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*, UIT Cambridge Ltd. Kindle Edition., 2016.
- [13] Paul Marienfeld GmbH & Co. KG, «<https://www.marienfeld-superior.com/laminas-portaobjetos-de-1-mm-de-espesor.html>,» [En línea].

Capítulo 4

Caracterización eléctrica:

Curvas Características Corriente - Tensión y

Respuesta Espectral

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización eléctrica de los detectores elaborados mediante curvas características corriente - tensión (I-V), para la obtención de los parámetros característicos de los detectores, y mediante respuesta espectral (RE) Los detectores que se analizan en este capítulo son los detectores elaborados de dos y cuatro cuadrantes, así como los detectores con un fotodiodo triangular y otro rectangular. Las diferentes condiciones en que se midieron las curvas I-V de los detectores elaborados son: descubiertos (sin vidrio), con vidrio y con ventana. La nomenclatura utilizada para identificar los detectores se basa en el número del proceso de difusión en el que fueron elaborados, seguido del número correspondiente a su posición en la oblea.

Con las curvas de los detectores sin vidrio, además de obtener los parámetros eléctricos de los fotodiodos, se realizó un control y análisis de fallas de las estructuras fabricadas, al comprobar la respuesta fotovoltaica y la aislación de los fotodiodos que componen el detector. En los casos en que el comportamiento de la curva I-V de los fotodiodos o entre las áreas activas no fue el esperado, se complementó la caracterización eléctrica con una inspección visual con microscopio óptico de la barrera de SiO₂ que separa las áreas activas y se realizó un ensayo destructivo con medición de resistencia in situ entre las áreas activas en el FIB (*Focus Ion Beam*). En una segunda etapa, se seleccionaron

los detectores con buena respuesta y se integraron en el sensor, midiendo la curva I-V del conjunto con vidrio y ventana, así como la RE.

4.1. Curva característica corriente – tensión (I-V)

4.1.1. Arreglo experimental

La caracterización eléctrica de cada fotodiodo mediante curvas I-V se realizó bajo condiciones estándares de irradiancia, contenido espectral y temperatura, esto significa que la iluminación utilizada tiene un espectro similar al espacial (AM0, con una irradiancia de 1367 W/m^2) y la muestra se mantuvo a una temperatura controlada de $28 \text{ }^\circ\text{C}$. Por su parte, la medición de la curva I-V entre las áreas activas se realizó en condiciones de oscuridad.

Para la iluminación de los fotodiodos se utilizó un simulador solar clase A del fabricante ScienceTech, modelo SS1KW [1], que utiliza una lámpara de 1 kW Xe con un filtro óptico para reproducir el espectro AM0. Para calibrar la potencia del simulador y garantizar una irradiancia equivalente a 1367 W/m^2 normalizada, se utilizó una celda de referencia calibrada de silicio. La temperatura se controló con una base termostatazada de estado sólido que utiliza el efecto Peltier. La medición de la curva I-V se realizó con una unidad de fuente y medición (SMU, por sus siglas en inglés, Source Meter Unit) modelo Keithley 2602A, el cual está equipado con un multímetro digital de $6\frac{1}{2}$ dígitos. La fuente de tensión tiene una precisión del $0,02\% + 400 \text{ } \mu\text{V}$ en el rango de 1 V y la medición de corriente tiene una precisión de $0,02\% + 2,5 \text{ } \mu\text{A}$ en el rango de 10 mA. El control y la adquisición de los datos se realizó desde una computadora mediante una interfaz programada en LabVIEW. La configuración de la medición se presenta en la Figura 4.1.

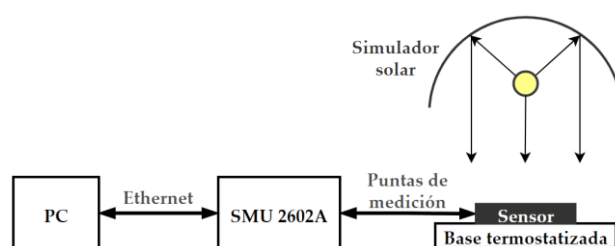


Figura 4.1. Arreglo experimental de medición de la curva I-V con iluminación.

Para las mediciones del detector con vidrio y con ventana, se utilizó el soporte diseñado y fabricado *ad hoc*, para garantizar una buena planitud del detector y el vidrio, así como una correcta alineación entre los componentes del sensor.

4.1.1.1. Procedimiento de medición de la curva I-V

Para esta medición se analiza el detector formado por un arreglo de fotodiodos como un dispositivo de 3 terminales, o más en función del diseño, del cual se analiza la característica eléctrica entre cada par de terminales. En la Figura 4.2 se ilustra el caso de un detector de dos fotodiodos integrados al que se le miden tres curvas I-V.

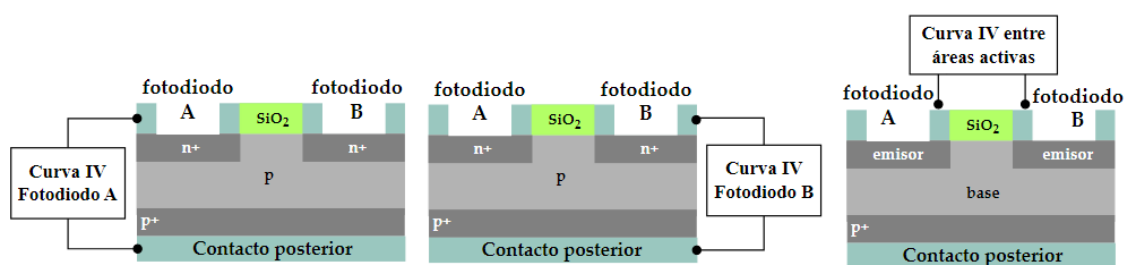


Figura 4.2. Configuraciones de medición de curva I-V del detector con dos fotodiodos.

El procedimiento para medir cada punto de operación de la curva I-V de un fotodiodo consiste en conectarle una carga electrónica (R_L) donde se mide la corriente que circula por la carga y la diferencia de potencial entre los terminales del fotodiodo. La carga electrónica puede ser pasiva como un arreglo de resistencias, o activa como una fuente que simula la caída de potencial en la carga. En caso de utilizar una fuente programable, esta debe poder trabajar en el cuarto cuadrante (tensiones positivas y corrientes negativas) para que la carga utilizada sea capaz de absorber la corriente generada por el fotodiodo.

La medición de los puntos de operación se realiza con una conexión de cuatro puntas, o configuración Kelvin, para eliminar el efecto de la caída de tensión de los cables de medición, Figura 4.3(a). En esta configuración, la corriente que circula por R_L se mide en un circuito independiente del circuito con el que se mide la caída de tensión en el dispositivo. Como la impedancia de entrada del circuito de medición de tensión es muy alta, la corriente fotogenerada no circulará a través de los cables de medición de tensión y se medirá solamente la caída de tensión en el dispositivo. De esta forma se asegura que, al utilizar una fuente para simular la carga electrónica, Figura 4.3(b), la tensión aplicada en el dispositivo tiene el valor de referencia programado. Al utilizar una fuente programable, en lugar de un banco de resistencias, se pueden obtener una gran cantidad de puntos de operación al realizar un barrido en la tensión aplicada.

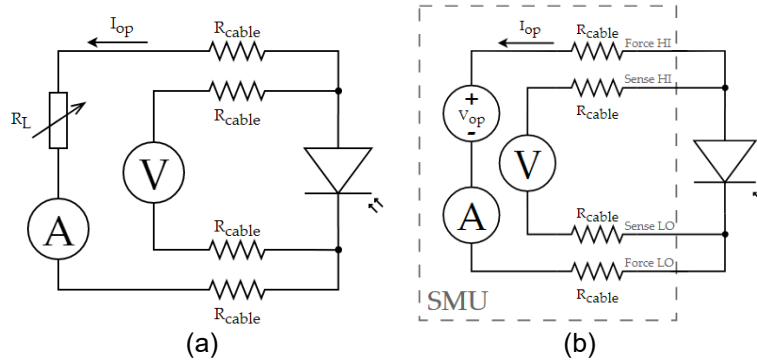


Figura 4.3. Esquema de medición con 4 puntas de cada fotodiodo, (a) con una resistencia variable, (b) con una fuente programable.

La curva I-V entre áreas activas se midió con este procedimiento y en todos los casos se dejaron desconectados los otros terminales del detector, como se ilustra en la Figura 4.2.

4.1.1.2. Modelo circuital del arreglo de dos fotodiodos

Se propone como modelo circuital para un detector de dos fotodiodos integrados, dos circuitos equivalentes de una juntura $p-n$ bajo iluminación [2], Figura 1.14(a) unidos por una resistencia entre los fotodiodos R_{AB} . La característica eléctrica esperada entre las áreas activas es de muy alta resistencia del orden de $M\Omega$. Si R_{AB} es baja habrá diafonía, el fotodiodo desconectado se comportará como una fuente de corriente en paralelo al fotodiodo medido y la corriente fotogenerada en ambos fotodiodos se colectará en el fotodiodo conectado. Por otra parte, si entre las áreas activas se observa un comportamiento tipo diodo, uno de los fotodiodos va a tener una curva rectificadora.

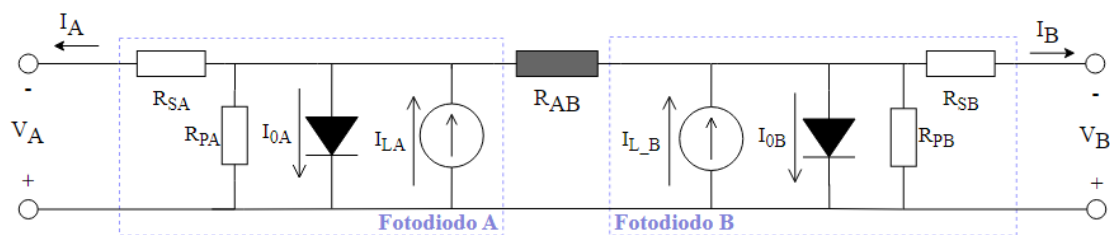


Figura 4.4. Modelo circuital del detector de dos fotodiodos.

4.1.2. Curva I-V del detector sin vidrio

En esta sección, el objetivo principal es caracterizar el proceso de elaboración de los dispositivos mediante curvas I-V y llegar a conclusiones que permitan optimizar su fabricación. Dado que este trabajo es la primera propuesta de elaboración de fotodiodos integrados en el grupo de investigación, la caracterización eléctrica proporciona una valiosa retroalimentación para el proceso de diseño y fabricación. Por esta razón, se

considera que es beneficioso mostrar las mediciones de todos los dispositivos con respuesta fotovoltaica obtenidos, incluso si su respuesta no es la ideal, para llegar a conclusiones importantes que guíen futuros procesos de diseño y fabricación de sensores finos.

4.1.2.1. Detectores de dos cuadrantes

Los detectores de dos cuadrantes se elaboraron en dos períodos del desarrollo de este trabajo. En cada etapa, se utilizaron diferentes métodos y parámetros para la obtención de los arreglos de fotodiodos, como se mencionó previamente en el Capítulo 3 “Fabricación de sensores solares finos”. Por lo tanto, los resultados se analizan de forma independiente para los fotodiodos obtenidos en cada etapa.

Primeramente, se caracterizaron los fotodiodos de los detectores de dos cuadrantes elaborados en la difusión 375, los cuales tienen forma semicircular de 3 mm de radio y aproximadamente 14 mm² de área activa. La separación entre fotodiodos es de 150 μm de ancho por diseño, la cual consiste en una barrera de SiO₂ de 400 nm de espesor definida mediante RIE. Con la curva I-V de las estructuras elaboradas se constató que solo los detectores que se encontraban dentro el área efectiva del proceso de fabricación de la barrera presentaron respuesta fotovoltaica, desaprovechando así una gran parte de la oblea. En la Figura 4.5 se muestra la curva I-V de un conjunto representativo de los detectores con respuesta fotovoltaica

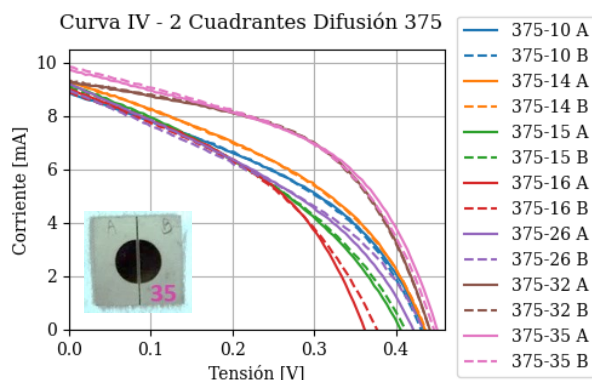


Figura 4.5. Curva I-V de los detectores de dos cuadrantes de la difusión 375 que presentaron respuesta fotovoltaica.

El primer resultado de la medición de los fotodiodos que presentaron respuesta fotovoltaica arrojó una I_{CC} mucho mayor a lo esperado (≈ 5 mA), tomando como referencia que la J_{CC} de los CSS elaborados en el DES es de aproximadamente 35 mA/cm². El valor elevado de la I_{CC} indica problemas de diafonía entre los fotodiodos, lo

que se corroboró al medir la curva I-V entre los fotodiodos, donde se obtuvieron comportamientos tipo resistencia menores a 20Ω en todos los detectores de la oblea.

En la Figura 4.6 se muestran las curvas I-V de cada fotodiodo y entre las áreas activas de dos casos particulares, el 375-15 y 375-32, la caracterización eléctrica se complementó con una inspección visual en el microscopio óptico de la barrera de SiO_2 que separa los fotodiodos. Lo que se observó en el microscopio tienen una relación directa con las curvas medidas: con una barrera mal definida, ancho menor a la mitad del valor diseñado, se observa en la curva I-V una mayor influencia de la R_P , pero esto no fue concluyente para definir la razón de la baja resistencia entre los fotodiodos.

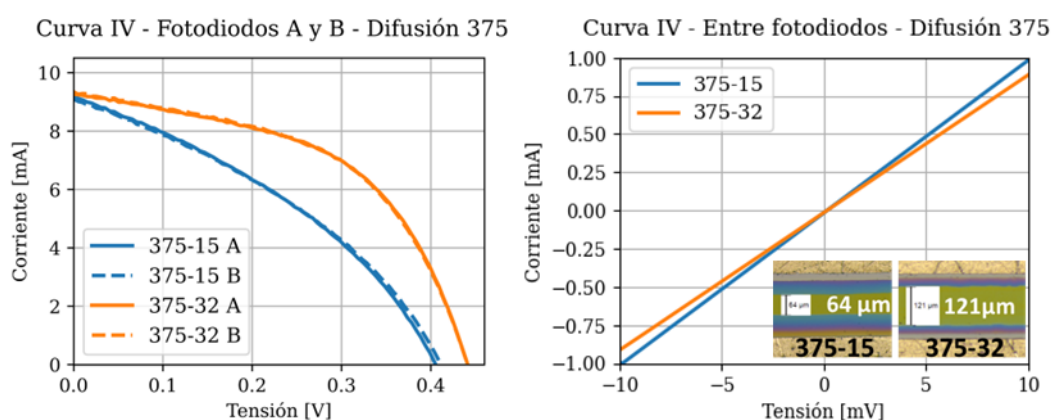


Figura 4.6. Curva I-V de los detectores 375-15 y 375-32, de cada fotodiodo (izquierda) y entre fotodiodos (derecha).

Para comprender mejor la causa del comportamiento de los dispositivos se sometió uno de los detectores a un ensayo destructivo en el FIB, el cual consistió en atacar la barrera de SiO_2 de una zona previamente aislada del resto de la oblea, Figura 4.7(a), y medir en simultáneo la resistencia entre los contactos a los costados de la barrera, Figura 4.7(b). En total se atacó 940 nm de profundidad en la zona del borde de la barrera, Figura 4.7(c). En la Figura 4.7 se muestra la curva de resistencia medida durante el ensayo.

Luego de 7 minutos de ataque, la resistencia cambió de cientos de ohm a $10^5 \Omega$ y en el próximo minuto se midió una resistencia en el orden de $10^6 \Omega$. En las imágenes SEM del FIB, Figura 4.7(d), se constató que el salto de resistencia a $10^5 \Omega$ se debió a que se atacó completamente la capa lateral de la barrera que es donde menor espesor de óxido había. Dado que no se encontraron justificaciones para explicar el comportamiento de los dispositivos, se realizaron modificaciones del proceso de fabricación.

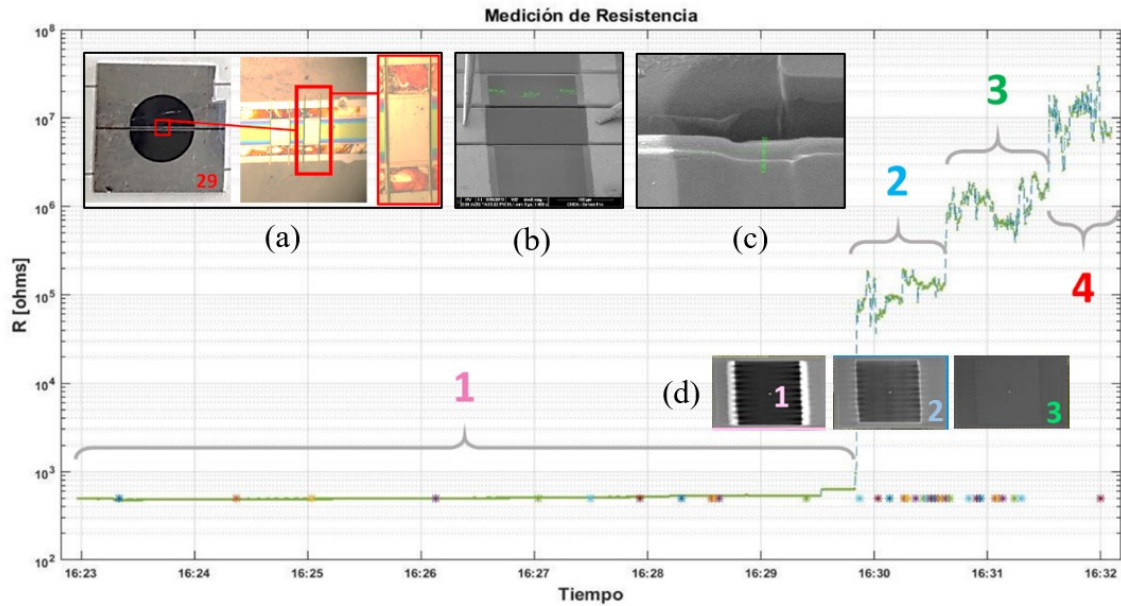


Figura 4.7. Ensayo FIB con medición de resistencia in-situ. (a) Zona aislada para el ensayo, (b) contactos de medición (c) profundidad atacada, (d) imágenes SEM durante el ataque.

Los detectores de dos cuadrantes modificados se muestran en la Figura 4.8. Las diferencias con los analizados previamente son: se aumentó el área activa de los fotodiodos, se disminuyó el espesor de la barrera de SiO_2 y se utilizó otro proceso para definir el ancho de la barrera de SiO_2 . Cada fotodiodo consiste en un semicírculo de 3,6 mm de radio, con área activa de aproximadamente 20 mm^2 . La barrera de SiO_2 para separar los fotodiodos se diseñó de $150 \mu\text{m}$ de ancho y 270 nm de espesor, definida mediante ataque químico húmedo con BHF. Con las modificaciones realizadas en la fabricación se logró obtener una mayor cantidad de dispositivos con respuesta fotovoltaica. Los cuatro detectores de la columna central de la oblea se descartaron por restos de óxido en el área activa debido a la técnica de fotolitografía utilizada.

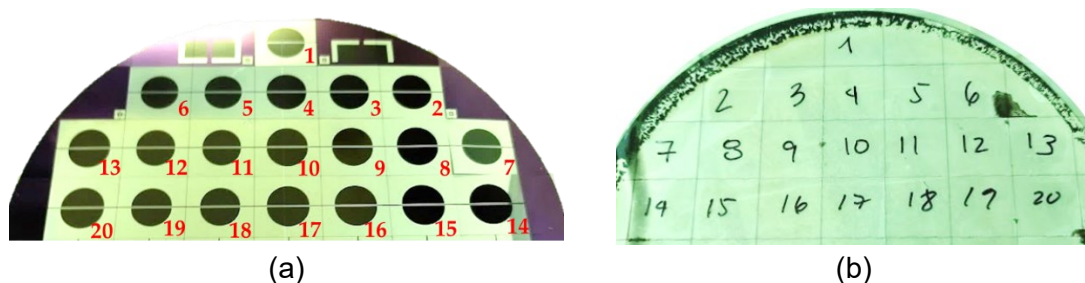


Figura 4.8. Posición en la oblea de los detectores caracterizados de dos cuadrantes de la difusión 389, (a) cara frontal espejada, (b) cara posterior.

En la Figura 4.9 se presenta la curva I-V de los fotodiodos de los detectores de dos cuadrantes elaborados en la difusión 389, respetando su posición en la oblea. Los primeros resultados de la caracterización eléctrica mostraron que, en gran parte de los dispositivos, solo un fotodiodo presenta una buena respuesta fotovoltaica y que la I_{CC} de los fotodiodos tiene un valor cercano al esperado que es de ≈ 7 mA.

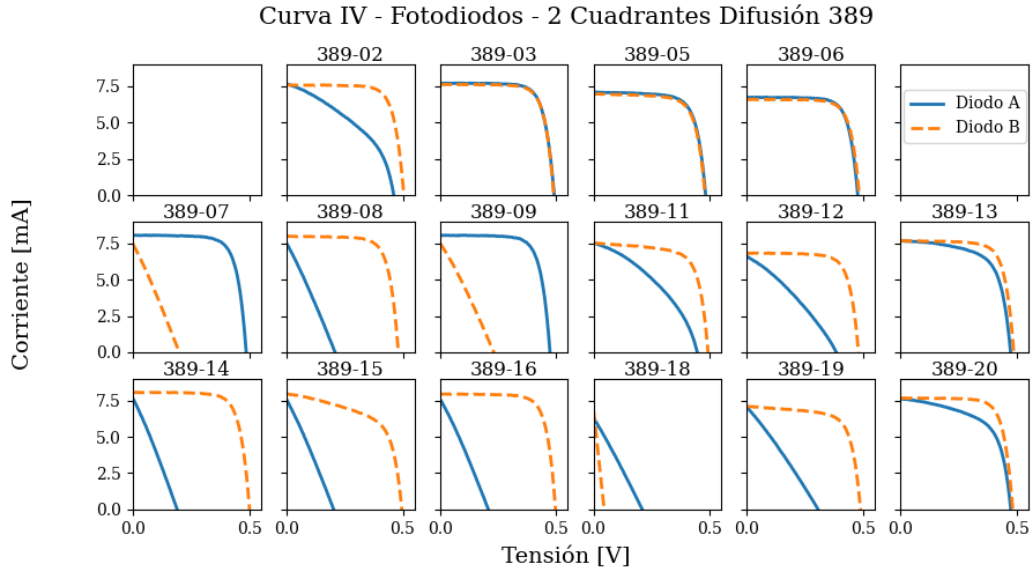


Figura 4.9. Curva I-V de cada fotodiodo de los detectores de dos cuadrantes de la difusión 389

Para completar la caracterización de los detectores elaborados se presenta el comportamiento eléctrico entre las áreas activas en la Figura 4.10.

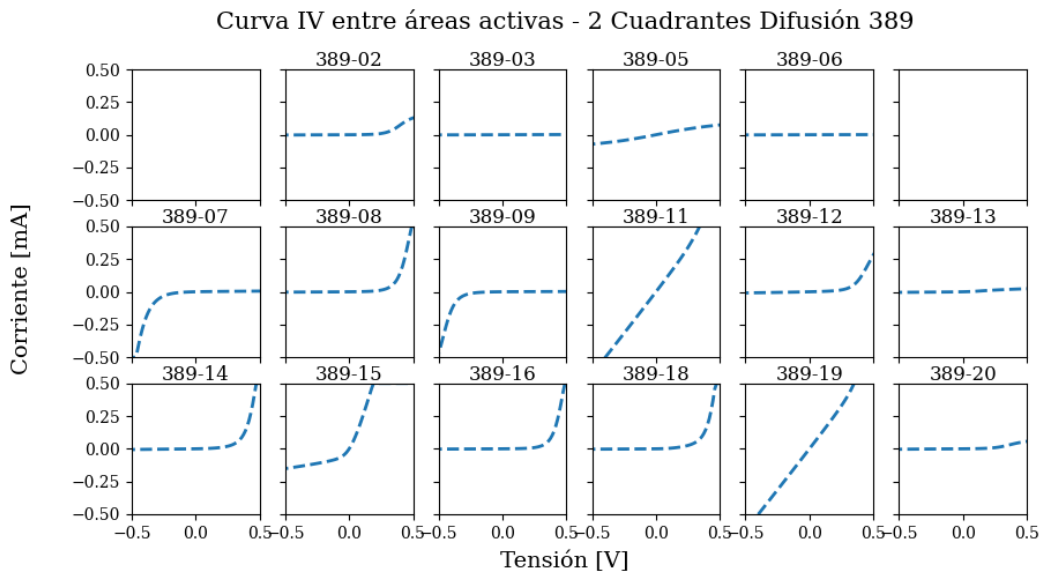


Figura 4.10. Curva I-V entre áreas activas de los detectores de dos cuadrantes de la difusión 389.

Se observa que los resultados obtenidos están correlacionados con la respuesta de los fotodiodos de la Figura 4.9. Los que tienen mejores curvas I-V, 389-03 y 389-06, se corresponden con un comportamiento de alta resistencia, de $4\text{ M}\Omega$ entre las áreas activas, mientras que en el 389-11 la resistencia es de $700\ \Omega$. En otros casos, se observó un comportamiento tipo diodo entre los fotodiodos los cuales se corresponden con los casos en que uno de los fotodiodos presenta una curva rectificadora.

Las mediciones se complementaron con una inspección visual en el microscopio óptico de la barrera de SiO_2 que se muestra en la Figura 4.11, donde se constató que la barrera de óxido del dispositivo llega a ser hasta la mitad del ancho diseñado y que a mayor ancho de la barrera mejor respuesta eléctrica del detector.

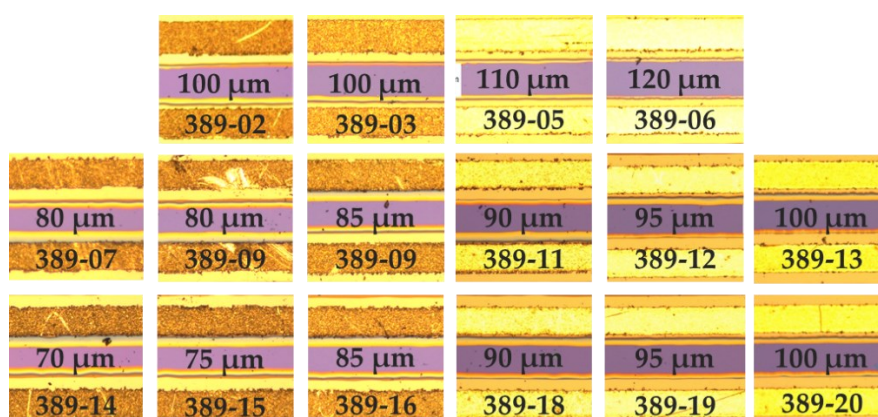


Figura 4.11. Inspección visual de la barrera de SiO_2 de los detectores de dos cuadrantes de la difusión 389 en el microscopio óptico.

Además, se observó que los comportamientos tipo diodo entre áreas activas se corresponden con barreras de ancho menor a $100\ \mu\text{m}$. En este sentido, cabe resaltar que el proceso para definir el ancho de la barrera de SiO_2 es isotrópico y en un medio líquido, lo que resulta en un ancho de la barrera poco homogéneo, pero que a su vez logra un mayor aprovechamiento de la superficie de la oblea en comparación con el método RIE. El comportamiento tipo diodo se puede atribuir a diferencias en el dopaje de cada fotodiodo sumado una barrera de difusión muy estrecha. Se concluyó que el detector de dos cuadrantes con mejores curvas I-V tiene una barrera de $120\ \mu\text{m}$ de ancho, en base a esto se plantea que el diseño final de la primera máscara de fotolitografía sea de $180\ \mu\text{m}$, para lograr una barrera cercana al valor de diseño de $150\ \mu\text{m}$.

4.1.2.2. Detectores de cuatro cuadrantes

En el marco de este trabajo se elaboraron diferentes arreglos de cuatro fotodiodos, dispuestos en cuatro cuadrantes. La principal diferencia entre los dispositivos está en que tienen diferentes anchos de la barrera de difusión.

En la Figura 4.12 se presenta la caracterización eléctrica de los detectores de cuatro fotodiodos elaborados en la difusión 387. Estos dispositivos se elaboraron para analizar el comportamiento eléctrico de los fotodiodos al aumentar el ancho de la barrera y modificar la geometría de los contactos. Se analizaron dos separaciones entre fotodiodos, de 1 y 2 mm por una barrera de SiO₂ de 270 nm de espesor, de forma tal que tienen un área activa cuadrada de 20 y 16 mm² respectivamente. Los fotodiodos muestran una buena respuesta fotovoltaica y una I_{CC} cercana al valor esperado. De la curva I-V se concluye que la disposición de los contactos introduce una resistencia serie que empeora el factor de forma de la curva I-V. A partir de las mediciones realizadas de los fotodiodos y entre sus áreas activas (Figura 4.13), se concluyó que hay buena aislación entre los fotodiodos.

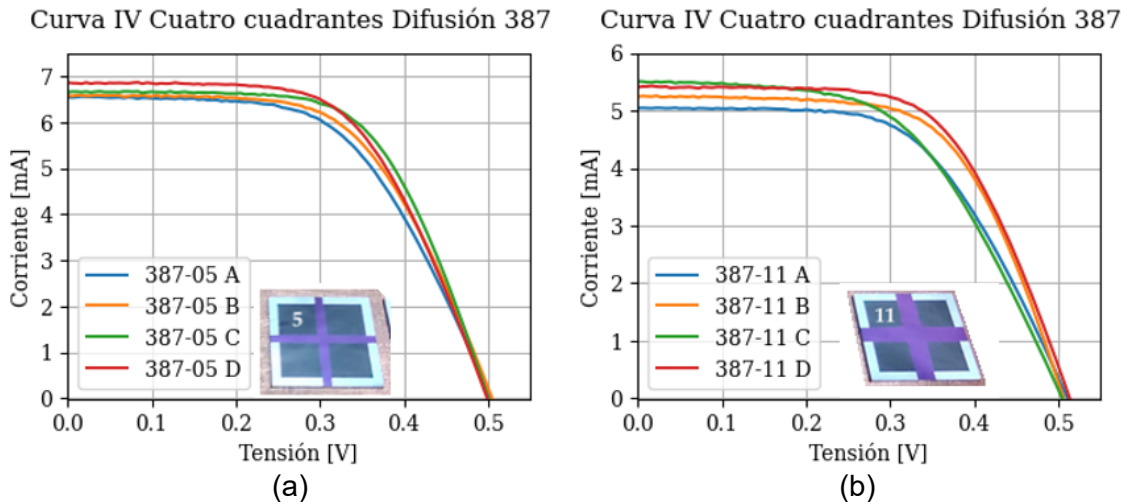


Figura 4.12. Curva I-V de los fotodiodos de los detectores de cuatro cuadrantes de la difusión 387, (a) con 1 mm y (b) con 2 mm de separación entre fotodiodos.

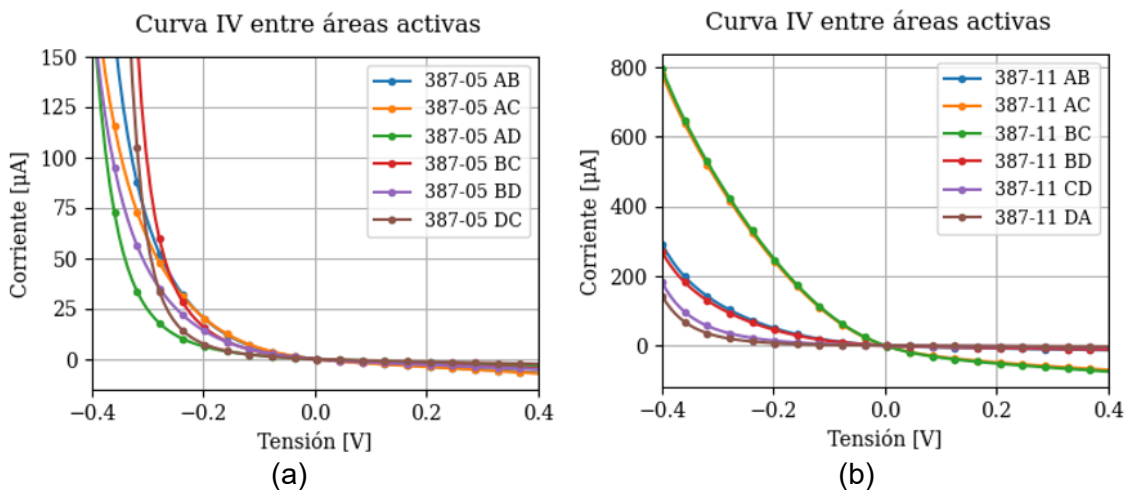


Figura 4.13. Curva I-V entre los fotodiodos de los detectores de cuatro cuadrantes elaborados en la difusión 387, (a) con 1 mm de separación entre fotodiodos, (b) con 2 mm de separación entre fotodiodos.

Por otro lado, se caracterizaron los detectores de cuatro cuadrantes elaborados en la difusión 389, donde cada fotodiodo consiste en un cuarto de círculo de 3,8 mm de radio, con área activa de 11,5 mm², Figura 4.14(a). La barrera de SiO₂ que separa los fotodiodos se diseñó de 150 μm de ancho y 270 nm de espesor, definida mediante un ataque químico húmedo. En la inspección visual en el microscopio óptico, Figura 4.14(b), se observó que el ancho de la barrera es menor al diseñado, similar a lo observado en los detectores de dos cuadrantes. Otra observación importante es que se aprecian diferencias en el ancho de la barrera en función de la dirección de ésta, el detector con las barreras más anchas es el 389-27.

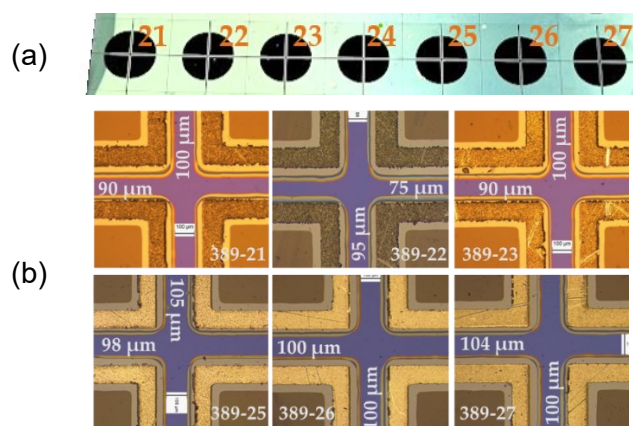


Figura 4.14. (a) Detectores de cuatro cuadrantes elaborados en la difusión 389, (b) inspección visual con microscopio óptico.

En la Figura 4.15 se presentan las curvas I-V de los fotodiodos de los detectores de cuatro cuadrantes de la difusión 389.

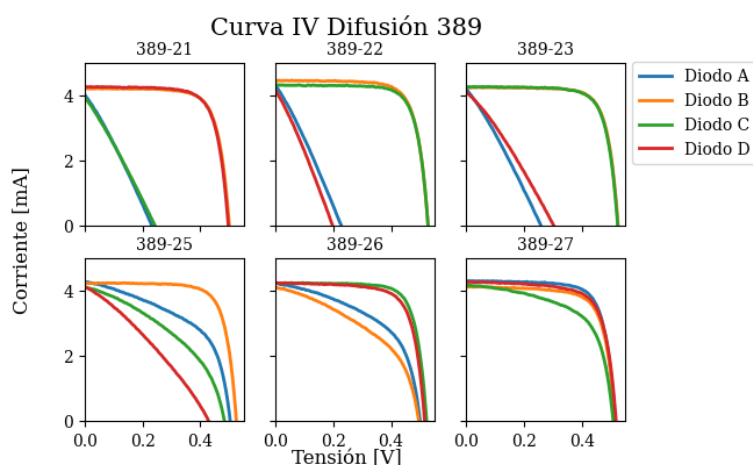


Figura 4.15. Curva I-V de los fotodiodos de los detectores de cuatro cuadrantes elaborados en la difusión 389.

Si bien todos los dispositivos tienen una ICC cercana al valor deseado, los que tienen una barrera de óxido más estrecha que lo deseado presentan curvas I-V rectificadas. En concordancia con lo observado en la inspección visual, el 389-27 es el que presenta mejor respuesta fotovoltaica en todos los fotodiodos.

En la Figura 4.16 se presenta la curva I-V de cada fotodiodo y entre fotodiodos del detector 389-27. Se observa que el fotodiodo C presenta mayor efecto de resistencia paralela y que la respuesta entre el área activa del fotodiodo C y los otros fotodiodos son menos resistivas.

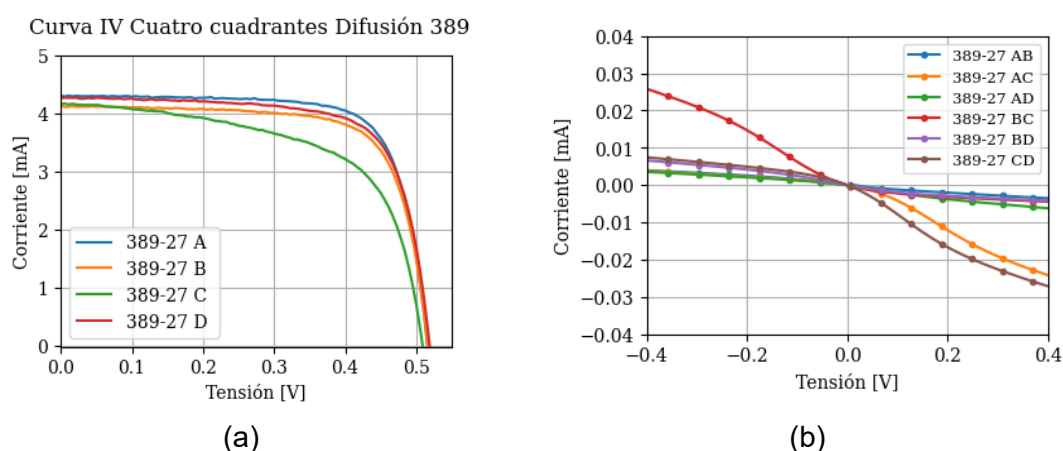


Figura 4.16. Curva I-V del 389-27, (a) de cada fotodiodo y (b) entre fotodiodos.

A diferencia de los dispositivos de cuatro cuadrantes elaborados en la difusión 387, en el 389-27 se observa una menor resistencia serie. La resistencia serie del dispositivo depende del diseño de los contactos, su longitud y área de la sección transversal. La respuesta observada se puede deber a que al aumentar la sección transversal de los contactos se obtiene una menor resistencia serie.

4.1.2.3. Detector con fotodiodo triangular y fotodiodo rectangular

En esta sección, se presenta inicialmente la caracterización de detectores elaborados con un solo fotodiodo de geometría triangular. Luego, se analizan dos detectores en los que se integra el fotodiodo triangular con el de referencia rectangular, separados por una barrera de 1 mm de ancho. Por último, se muestran los resultados de los detectores en los que la separación entre el fotodiodo triangular y el rectangular es de 600 μm .

En la Figura 4.17 se muestran los dispositivos con un único fotodiodo triangular que se caracterizaron eléctricamente, los cuales se elaboraron en el proceso de difusión 387 y se diseñaron de dos tamaños, con áreas activas de 21 y 28,5 mm^2



Figura 4.17. Fotodiodos triangulares, difusión 387.

En la Figura 4.18 se presentan las curvas I-V de los fotodiodos triangulares que tienen el área activa bien definida, sus posiciones en la oblea están identificadas en la Figura 4.17. Todos los fotodiodos presentaron respuesta fotovoltaica y los de menor área activa tienen menor efecto de resistencia serie, por tanto, mejor factor de forma. Además, se observa que las mejores curvas I-V se corresponden con el 387-30 y el 387-31 para cada caso, la J_{CC} calculada de estos fotodiodos es de $0,35 \text{ mA/mm}^2$. Estos dispositivos se elaboraron para comparar su respuesta con la de los fotodiodos integrados, sirviendo como parámetro de referencia en ensayos de daño por radiación.

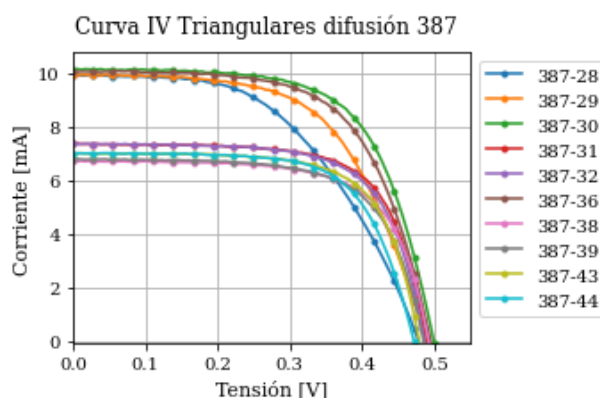


Figura 4.18. Curva I-V fotodiodos triangulares difusión 387 sin SiO_2 .

El detector de un sensor solar fino de un eje basado en un fotodiodo triangular utiliza como referencia un segundo fotodiodo de área rectangular. Se caracterizaron mediante la curva I-V los detectores con fotodiodos triangular y referencia rectangular integrados y separados por una barrera de SiO_2 de 1 mm de ancho y 270 nm de espesor, elaborados en la difusión 387. En la Figura 4.19, se presenta la curva I-V de dos detectores que difieren en el área activa de los fotodiodos. La I_{CC} de cada fotodiodo se corresponde con el valor esperado, lo que indica que no hay diafonía entre los fotodiodos, la resistencia entre las áreas activas del 387-06 es de $0,2 \text{ M}\Omega$. Además, en la respuesta de todos los fotodiodos evidencia efectos de resistencia serie que empeoran el factor de forma de la curva I-V.

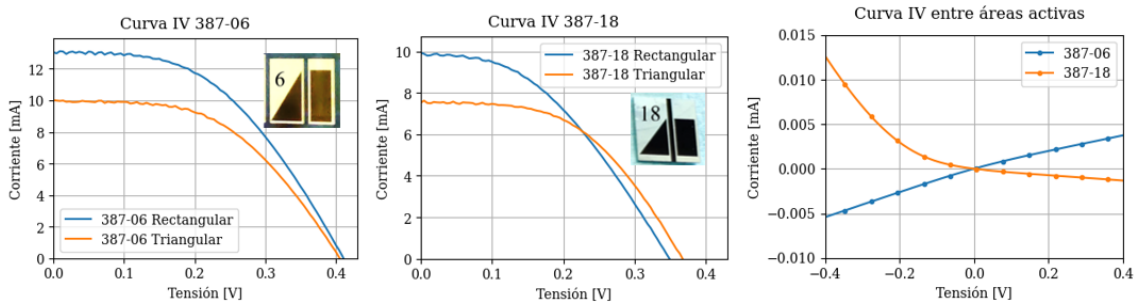


Figura 4.19. Curvas I-V de los detectores triangulares con referencia rectangular y separación de 1mm.

El último conjunto de detectores con fotodiodo triangular caracterizado son los correspondientes al proceso de difusión 389 que se muestran en la Figura 4.20. Estos detectores tienen un área activa de 28 y 33 mm² para el fotodiodo triangular y rectangular respectivamente. Los fotodiodos están separados por una barrera de SiO₂ de 600 μm de ancho y 270 nm de espesor.



Figura 4.20. Detectores con fotodiodos triangular y referencia rectangular, difusión 389.

La medición de la curva I-V de los fotodiodos, Figura 4.21, muestra que la I_{CC} está en el rango esperado y que en la mayoría de los casos la curva de al menos uno de los fotodiodos presenta baja resistencia paralelo.

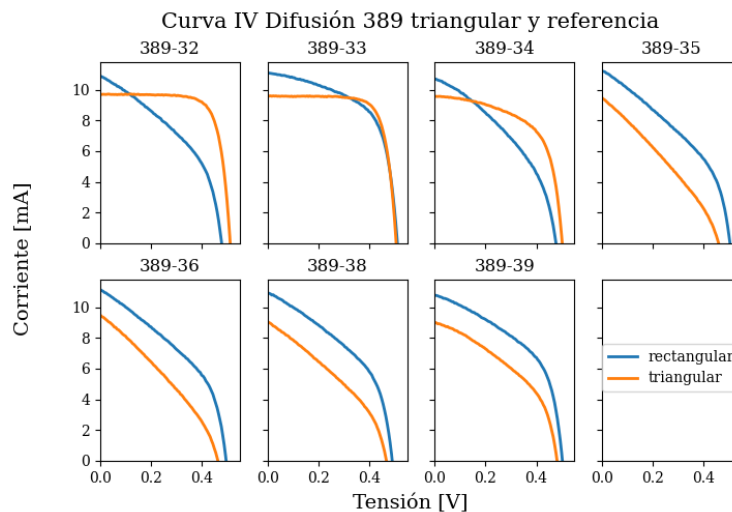


Figura 4.21. Curvas I-V de los fotodiodos triangular y rectangular de los detectores elaborados en la difusión 389.

La caracterización del comportamiento eléctrico entre fotodiodos, Figura 4.22, arrojó como resultado que en ningún caso hay un comportamiento puramente resistivo y esto afecta la respuesta de los fotodiodos como se discutió previamente. La mejor respuesta se corresponde con el detector 389-33, que tiene una J_{CC} de 0,34 mA/mm² en el fotodiodo triangular y 0,36 mA/mm² en el fotodiodo rectangular.

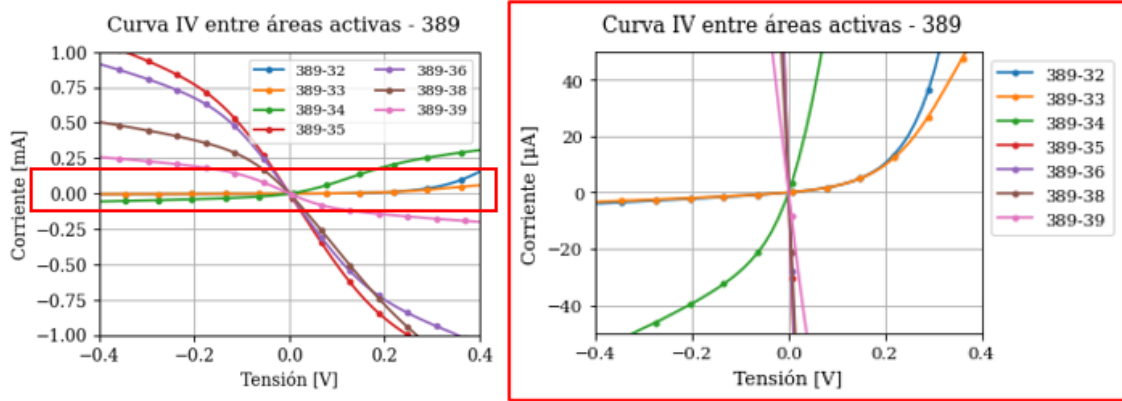


Figura 4.22. Curvas I-V entre fotodiodos y ampliación en los valores cercanos a 0 A.

4.1.3. Curva I-V del detector con vidrio

A partir del análisis presentado en la sección anterior, se seleccionaron los detectores de dos y cuatro cuadrantes que presentan la mejor respuesta y se caracterizó su curva I-V al colocarle encima un vidrio de 1 mm de espesor, de iguales características que el substrato de la ventana. En esta sección se muestran solamente los resultados obtenidos para los detectores 389-06 y 389-27.

En la Figura 4.23 se muestran las curvas I-V de los detectores, antes y después de colocar el vidrio sobre el área activa de los fotodiodos. En los gráficos se observa que el vidrio atenúa la corriente de cortocircuito de los detectores.

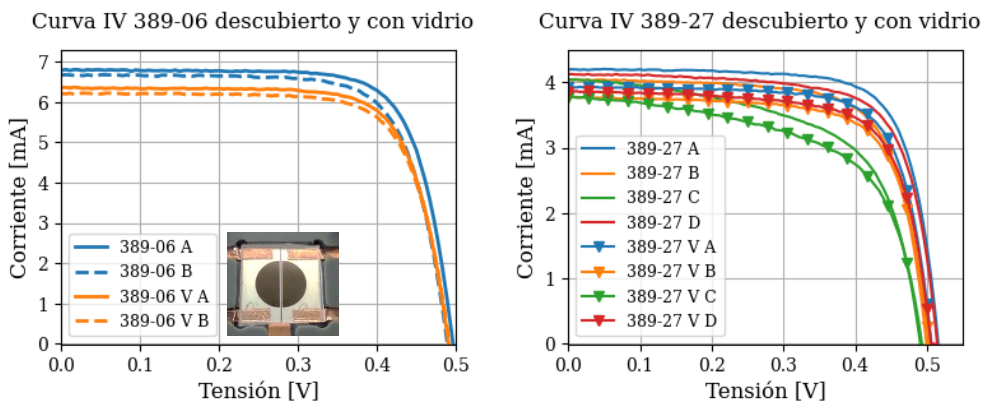


Figura 4.23. Curva I-V con vidrio y sin vidrio de detectores 389-06 y 389-27, de dos y cuatro cuadrantes.

A partir de las curvas I-V de cada detector, se realizó una regresión lineal con los criterios citados en [3] para obtener la I_{CC} de cada fotodiodo. En la Tabla 4.1 se resume la I_{CC} antes y después de colocar el vidrio. La I_{CC} disminuye entre 6 y 7 % al colocar el vidrio de 1 mm de espesor.

Tabla 4.1. I_{CC} y J_{CC} extraídas de las curvas I-V de los detectores sin vidrio y con vidrio.

Detector	Fotodiodo	Sin Vidrio		Con Vidrio		Disminución con el vidrio (%)
		I_{CC} (mA)	J_{CC} (mA/cm ²)	I_{CC} (mA)	J_{CC} (mA/cm ²)	
389-06	A	6,8	34,5	6,4	32,3	6,5
	B	6,7	33,9	6,2	31,6	6,8
389-27	A	4,2	36,5	3,9	34,1	6,5
	B	4,1	35,1	3,8	32,8	6,6
	C	4,1	35,2	3,8	32,9	6,7
	D	4,1	35,8	3,9	33,6	6,3

A partir de la I_{CC} extraída de la curva I-V y el área activa de cada fotodiodo, se calculó que el 389-06 tiene una J_{CC} de 0,34 mA/cm² sin vidrio y con vidrio de 0,32 mA/mm², estos parámetros eléctricos nos permiten conocer la respuesta esperada del detector con ventana.

4.1.4. Curva I-V del sensor integrado: detector con ventana

En la última etapa de la caracterización mediante curvas I-V, se caracterizó el conjunto detector con ventana, integrados en el soporte fabricado para garantizar una buena alineación entre ambos componentes del sensor. La medición se realizó con incidencia normal de la luz. Se caracterizó la respuesta de los detectores al utilizar las ventanas elaboradas con geometría cuadrada y circular. La ventana circular utilizada tiene una apertura de 2 mm de diámetro y la rectangular de 1,8 mm de lado. En la Figura 4.24 se muestran dos de las estructuras caracterizadas: el sensor de un eje con ventana cuadrada y detector de dos cuadrantes; y el sensor de dos ejes con ventana circular y detector de cuatro cuadrantes.

El área iluminada en cada fotodiodo del detector de dos cuadrantes en 0° es 1,2 mm² con la ventana circular y 1,3 mm² con la cuadrada, calculado con el modelo de cada sensor. Teniendo en cuenta una J_{CC} de 0,35 mA/mm², se espera una I_{CC} de aproximadamente 0,4 mA en cada fotodiodo con la ventana circular y de aproximadamente 0,45 mA con la ventana cuadrada.

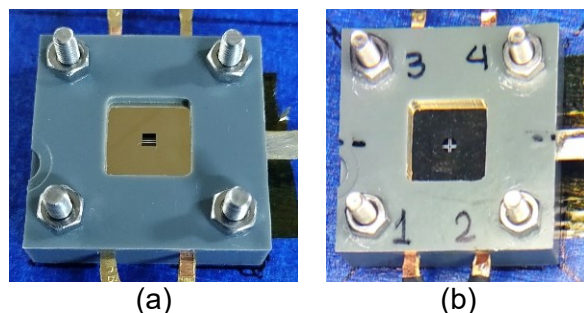


Figura 4.24. (a) Sensor de un eje con ventana cuadrada y detector de dos cuadrantes, (b) sensor de dos ejes con ventana circular y detector de cuatro cuadrantes.

En la Figura 4.25 se muestran las curvas I-V del sensor de un eje con detector de dos cuadrantes, 389-06, con ventanas cuadrada y circular. Comparando esta medición con la curva I-V del detector con vidrio, se concluye que con la ventana se obtiene menor V_{OC} . Por otro lado, la I_{CC} se encuentra en el rango esperado, pero no se observan las diferencias esperadas entre geometrías de ventana.

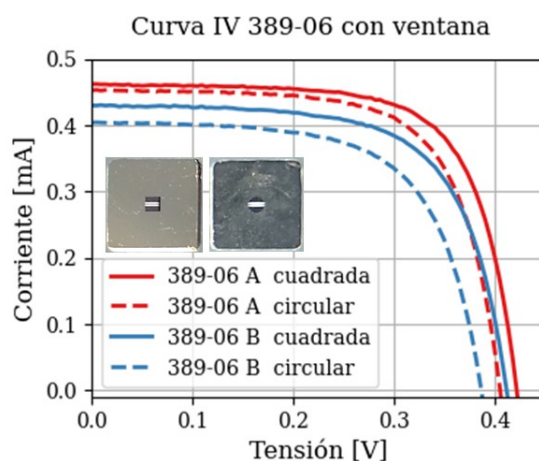


Figura 4.25. Curva I-V del detector de dos cuadrantes, con ventanas circular y cuadrada.

En la Tabla 4.2 se presenta la I_{CC} de cada fotodiodo del detector 389-06 para cada ventana utilizada. Cabe mencionar que la J_{CC} no se calculó con la I_{CC} medida en la curva I-V debido a que no se conoce con exactitud el área iluminada en cada fotodiodo, ya que pueden existir errores de alineación entre la ventana y el detector.

Tabla 4.2. 389-06, I_{CC} y J_{CC} para los dos diseños de ventana.

Sensor	Ventana Cuadrada	Ventana Circular
389-06	I_{CC} (mA)	I_{CC} (mA)
A	0,46	0,45
B	0,43	0,40

La medición de la Curva I-V del sensor de dos ejes con detector de cuatro cuadrantes, con ventanas cuadrada y circular se presenta en la Figura 4.26. En el caso del detector de cuatro cuadrantes, el área iluminada en cada fotodiodo en 0° con la ventana circular es $0,47 \text{ mm}^2$, y $0,53 \text{ mm}^2$ con la cuadrada, calculado a partir del modelo de cada sensor. Teniendo en cuenta una J_{CC} $0,35 \text{ mA/mm}^2$, se espera una I_{CC} de aproximadamente $0,16 \text{ mA}$ en cada fotodiodo con la ventana circular y de aproximadamente $0,18 \text{ mA}$ con la ventana cuadrada.

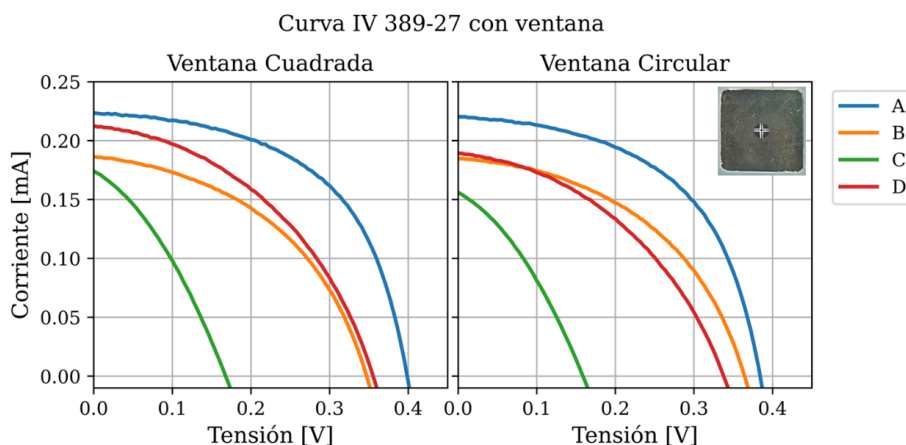


Figura 4.26. Curva I-V del detector de cuatro cuadrantes 389-27 con ventanas cuadrada y circular.

Similar a lo observado en el detector de dos cuadrantes, el V_{OC} disminuye al colocar la ventana y se puede apreciar que el factor de forma de las curvas empeora considerablemente, principalmente en el fotodiodo C. En la Tabla 4.3 se presenta la I_{CC} y la J_{CC} de cada fotodiodo del 389-27 en función de la ventana utilizada.

Tabla 4.3. 387-27: I_{CC} para las dos geometrías de la ventana.

Sensor	Ventana Cuadrada	Ventana Circular
389-27	I_{CC} (mA)	I_{CC} (mA)
A	0,22	0,22
B	0,19	0,19
C	0,17	0,16
D	0,21	0,19

4.2. Respuesta espectral

En esta sección se muestran los resultados de la medición de la respuesta espectral de los detectores de dos cuadrantes 389-06 y 389-20, así como del detector con fotodiodos triangular y rectangular 387-07. En el capítulo de ensayo de ambiente espacial se retoma esta caracterización como herramienta para determinar la degradación de los dispositivos.

4.2.1. Arreglo experimental

En el “Laboratorio de caracterización” del DES se cuenta con un equipo de fabricación propia para medir respuesta espectral de acuerdo con las normas IRAM [4] y ASTM [5]. En la Figura 4.27 se muestra el equipo utilizado para la medición de RE. [6, 7]

Este equipo utiliza una fuente de luz pulsada monocromática, que se logra al pasar la luz de una lámpara halógena de tungsteno de 250 W por un conmutador mecánico rotativo (*chopper*) con una frecuencia conocida, luego se pasa por una rueda de filtros, que contiene 16 filtros de banda angosta entre 340 y 1100 nm. La medición se realiza a temperatura controlada de 25°C, por lo que se ubica el dispositivo a medir (DUT) sobre una base termostatazada.

Para medir la respuesta del DUT a cada longitud de onda incidente este se pone en condición de cortocircuito con una resistencia externa, sobre la cual se mide una diferencia de potencial que es adquirida con un *lock-in*. Con este equipo se pueden medir dispositivos de diferentes áreas, teniendo en cuenta que la resistencia externa debe ser la adecuada para poner el DUT en cortocircuito. La RE se obtiene al relacionar las tensiones medidas de la referencia y el DUT, con sus áreas y la RE de la referencia, como se detalla en la Ec. 4.1. El control de la rueda de filtros y del *lock-in* se realiza desde una PC con un programa desarrollado en el DES.

$$RE(\lambda) = \frac{A_{ref}}{A_{DUT}} \frac{V_{DUT}(\lambda)}{V_{ref}(\lambda)} RE_{ref}(\lambda) \quad (4.1)$$

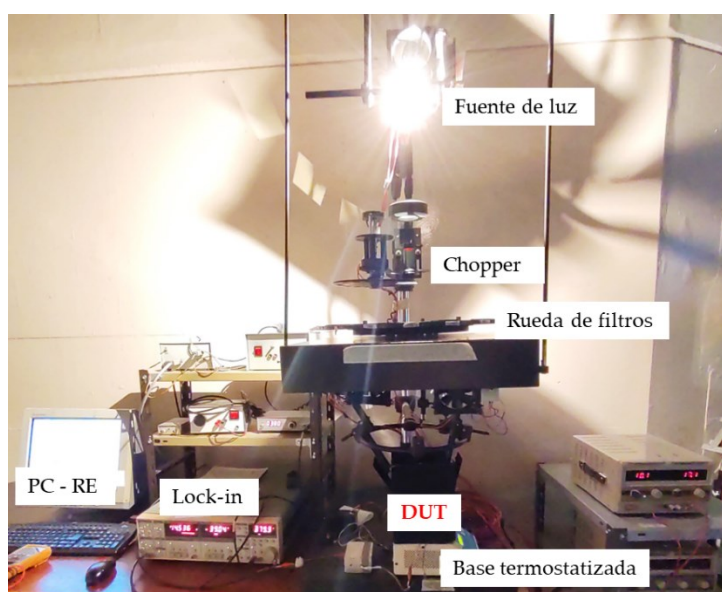


Figura 4.27. Equipo de medición de Respuesta Espectral.

4.2.2. Respuesta espectral: Resultados

Se caracterizó la respuesta espectral (RE) de los detectores elaborados y se presenta, en la Figura 4.28, la medición realizada de los detectores de dos cuadrantes 389-06 y 389-20, así como del 387-06. El objetivo de mostrar estas tres mediciones es para poder comparar como varía la RE entre difusiones: 387-06 y 389-06; y entre dispositivos de una misma difusión e igual área activa pero diferentes comportamientos de la curva I-V: 389-06 y 389-20. La medición se realizó con el detector sin vidrio y solamente se polarizó el fotodiodo bajo estudio.

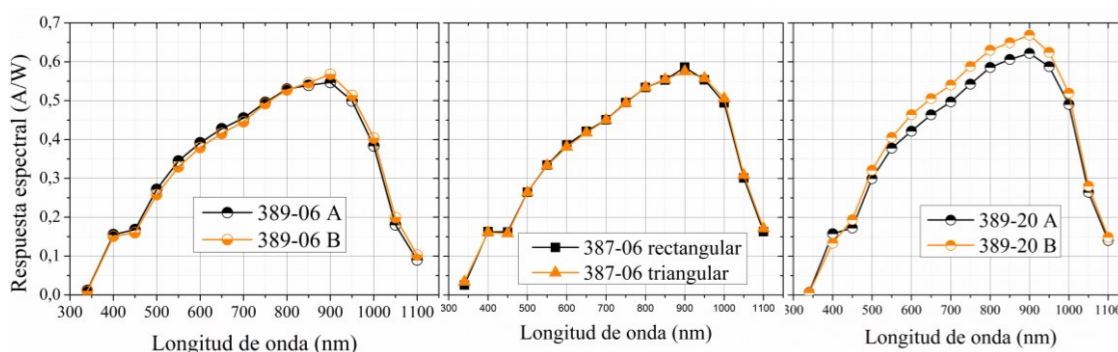


Figura 4.28. Respuesta espectral de los detectores 389-06, 387-06 y 389-20.

En la Tabla 4.4 se muestra la I_{CC} calculada a partir de integrar el área bajo la curva de RE de cada fotodiodo, para obtener la J_{CC} (Ec. 1.33) y luego multiplicarla por el área activa de cada fotodiodo. Además, se muestra la comparación con la I_{CC} calculada a partir de la curva I-V de los fotodiodos. Se observan pequeñas diferencias en el valor de la I_{CC} calculada por ambos métodos, siendo más significativas en el 389-20A, que es el que tiene una curva I-V con menor resistencia paralela.

Tabla 4.4. I_{CC} calculada a partir de la RE y la I_{CC} .

	$I_{CC} (RE) [mA]$	$I_{CC} (IV) [mA]$
389-06 A	6,7	6,8
389-06 B	6,7	6,7
389-20 A	7,5	7,9
389-20 B	8,0	7,9
387-06 triangular	9,9	10,2
387-06 rectangular	13,4	13,5

4.3. Conclusiones

Se caracterizaron mediante curvas I-V los detectores elaborados de dos y cuatro cuadrantes, así como los detectores con un fotodiodo triangular y otro rectangular. Todos

los detectores elaborados fueron medidos sin vidrio ni ventana y los resultados de las mediciones eléctricas fueron complementados con una inspección visual de la barrera de difusión de SiO₂ entre las áreas activas con microscopio óptico. Esto permitió realizar un análisis de las fallas de las diferentes estructuras con el objetivo de optimizar los procesos de elaboración empleados. Se concluyó que el ancho de la barrera de difusión tiene una repercusión directa en la respuesta eléctrica de los fotodiodos y entre ellos.

En este sentido, se concluyó que el detector de dos cuadrantes con mejores curvas I-V tiene una barrera de 120 μm de ancho y 270 nm de espesor, en base a esto se plantea que el diseño final de la primera máscara de fotolitografía debe ser de 180 μm de ancho y que se mantenga la técnica de ataque químico húmedo como método de elaboración de la barrera de difusión, para lograr una barrera cercana al valor de diseño de 150 μm .

De las curvas I-V se concluyó que la geometría de los contactos en los detectores de cuatro cuadrantes de la difusión 389, proporciona una menor resistencia serie que la de los contactos en los detectores de cuatro cuadrantes de la difusión 387. Por otro lado, los fotodiodos triangulares con referencia rectangular tienen curvas con alta R_s , lo cual afecta el factor de forma de la curva característica.

Por otro lado, se observó que, al colocar el vidrio de 1 mm de espesor, la I_{CC} de los fotodiodos disminuye entre aproximadamente 7%. En las mediciones de los detectores con la ventana colocada se observó que el V_{OC} disminuye al colocar la ventana y que el factor de forma de la curva I-V empeora, en el caso del detector de cuatro cuadrantes empeoró en mayor medida.

Con la medición de RE se verificó el comportamiento de los detectores en función de la longitud de onda de la radiación incidente. Se comparó la I_{CC} obtenida con este método y con la curva I-V, no obteniéndose diferencias significativas entre ambas caracterizaciones.

Referencias

- [1] Sciencetech, «www.sciencetech-inc.com,» [En línea]: <https://www.sciencetech-inc.com/shop/product/165-9001-ss1-0kw-1000w-fully-reflective-solar-simulator-4062?category=45>.
- [2] M. Green, Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications, Prentice-Hall, 1982.
- [3] A. Luque y S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2010, p. 818.

- [4] IRAM 210013-12, «Energía solar. Módulos fotovoltaicos. Parte 12 - Métodos de ensayo de la respuesta espectral de celdas fotovoltaicas.,» Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, 2012.
- [5] ASTM E1021-15, «Standard Test Methods for Measuring the Spectral Response of Photovoltaic Cells,» ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [6] S. E. Fortin, M. G. Martínez Bogado y J. C. Plá, «Respuesta espectral de celdas solares multijuntura para aplicaciones espaciales: diseño del equipo y primeras mediciones,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, vol. 9, pp. 1-6, 2005.
- [7] H. Socolovsky, J. García y J. Plá, «Setup development for spectral response measurement on multijunction solar cells,» de *Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Valencia, Spain, 2010.

Capítulo 5

Caracterización de la respuesta angular

En este capítulo se presenta la caracterización eléctrica de los dispositivos elaborados al variar el ángulo de incidencia de la fuente de luz, lo que se define como respuesta angular. Esta medición consiste en registrar la corriente de cortocircuito, I_{CC} , de cada fotodiodo del sensor para las diferentes posiciones en cenit, θ , y azimut, φ , de la luz incidente. Para esto, se desarrolló una base de posicionamiento motorizada con dos ejes de libertad y un programa en LabVIEW, que controla tanto la medición como el movimiento de la base. A través de la respuesta angular, se caracteriza el error direccional del detector, el campo de visión (FOV) y la función de transferencia de los sensores.

La caracterización de los sensores se realizó en varias etapas, primero se caracterizó el detector y, posteriormente, el sensor integrado. En la primera etapa, se evaluó la respuesta de los detectores elaborados con el vidrio colocado, sin ventana, y esta se comparó con la ley del coseno para calcular el error direccional. En la segunda etapa, se caracterizó el sensor integrado en el soporte, compuesto por el detector, el vidrio y la ventana. Las mediciones obtenidas se compararon con las simulaciones previas de la I_{CC} y la función de transferencia, H , de cada diseño definidas en el Capítulo 2 “Diseño y simulación de sensores solares finos”. Como complemento, en este capítulo se propone un método para determinar la incidencia normal de la luz en el arreglo experimental utilizado, y se presenta una metodología para determinar el error de alineación entre el detector y la ventana al integrar el sensor.

En las siguientes secciones, se presentan los resultados de la caracterización de la respuesta angular del sensor de un eje con detector de dos cuadrantes, y del sensor de

dos ejes con detector de cuatro cuadrantes. Para ello, se seleccionaron los sensores cuyos detectores exhibieron las mejores curvas I-V de sus fotodiodos, presentadas anteriormente en el capítulo 4 “Caracterización eléctrica: Curvas características Corriente - Tensión y Respuesta Espectral”.

5.1. Arreglo experimental y procedimiento de medición

En el laboratorio, se pueden simular las variaciones del ángulo de incidencia de la fuente de luz de diferentes formas. Una alternativa es, variar la posición de la fuente de luz de forma controlada y mantener el sensor en una posición fija. La otra alternativa es, mantener el simulador solar fijo y variar el ángulo de elevación y rotación del sensor como se muestra en la Figura 5.1. El ángulo de elevación de la base se corresponde con el ángulo cenital (ϑ) y el ángulo de rotación de la base se corresponde con el ángulo azimutal (φ) del Sol. Para caracterizar la respuesta angular, se utilizó este criterio debido a que los simuladores solares con los que se cuenta en el DES están fijos.

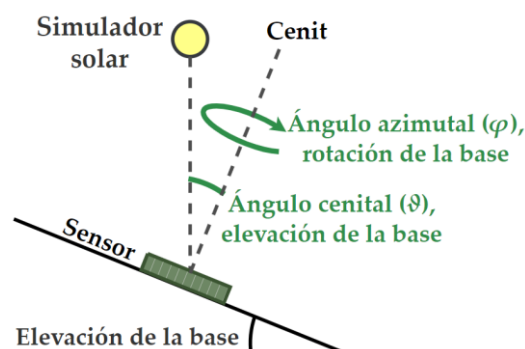


Figura 5.1. Representación esquemática de la variación del ángulo de incidencia de la luz en el sensor al mantener el simulador solar fijo.

En el marco de esta tesis, se desarrolló una base motorizada que se controla desde una PC y permite mover el sensor con dos grados de libertad, esta medición se realizaba anteriormente con una base mecánica con ajuste manual. La base fabricada se mueve libremente en rotación, mientras que en elevación se mueve desde la posición horizontal hasta 75° de elevación en un único sentido. El 0° de elevación se puede ajustar manualmente con la ayuda de un nivel o se puede fijar en un valor cercano a 0° y realizar un ajuste posterior con los datos medidos.

En la Figura 5.2, se muestran los diferentes componentes de la base electromecánica desarrollada, así como el movimiento del sensor en la base. La base electromecánica cuenta con dos motores paso a paso NEMA 17 que permiten su movimiento en dos direcciones, uno para la elevación y otro para la rotación. Los motores tienen un ángulo

de paso de $1,8^\circ$ con un reductor de 1:5, por lo que el eje de salida gira $0,36^\circ$ por paso del motor y se necesitan 1000 pasos para dar una vuelta completa, además los drivers del motor se configuraron para dar 1/32 micro pasos, con lo que se pueden lograr en teoría pasos de $0,016^\circ$. Para detectar la posición inicial de rotación y elevación, se utilizan dos sensores de posición. El sensor de rotación es óptico y está empotrado en la base, mientras que el sensor de elevación es un fin de carrera mecánico y su posición es ajustable, con lo que se puede modificar la posición inicial del movimiento de elevación.

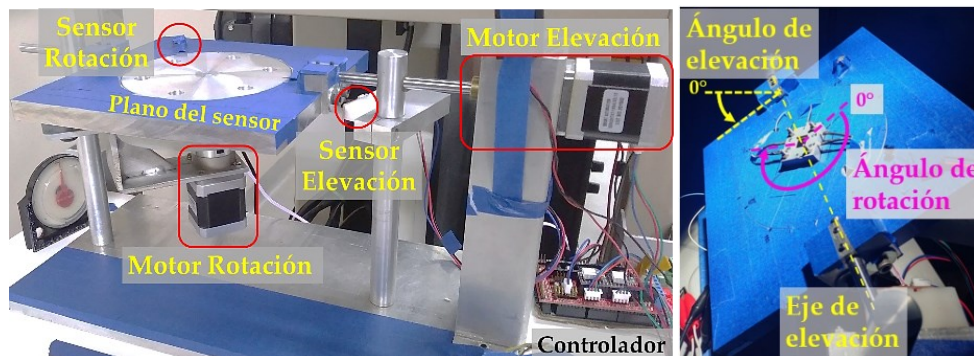


Figura 5.2. Base electromecánica desarrollada.

Para la caracterización de respuesta angular, se desarrolló un programa con una interfaz gráfica en LabVIEW para controlar la base y adquirir los valores de corriente y tensión de la medición. El programa se ejecuta desde una PC y se comunica mediante puerto serie (USB) con la placa Arduino Mega 2560 para el control de los motores de la base, y mediante TCP/IP con el SMU (Figura 5.3).

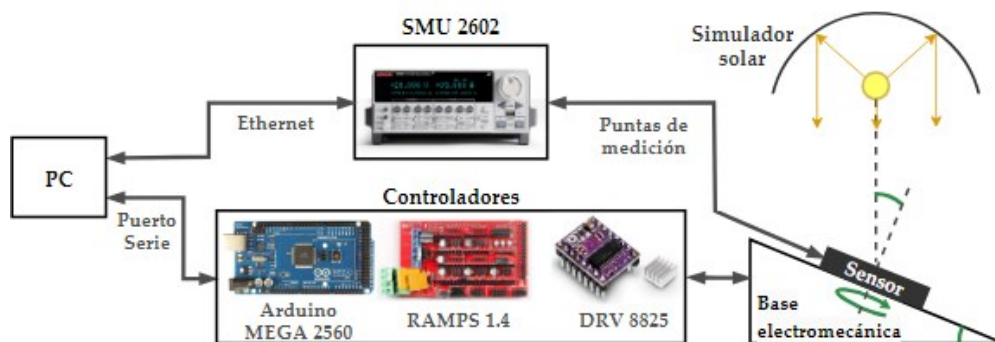


Figura 5.3. Esquema de medición de respuesta angular para controlar la posición del dispositivo y adquirir los datos.

En el microcontrolador del Arduino se programaron funciones específicas para detectar la posición inicial con los sensores y modificar la velocidad de los motores. Los sensores de posición se conectaron directamente a la placa Arduino. La interfaz entre el

microcontrolador y los motores está formada por la placa RAMPS 1.4 para la electrónica de potencia, y los integrados DRV8825 para manejar la corriente que se entrega a los motores.

El programa permite seleccionar que tipo de medición se desea realizar:

- 1) con un grado de libertad, donde se varía solamente la elevación de la base,
- 2) con dos grados de libertad, donde se varían tanto la elevación como la rotación.

El ángulo de rotación se programó para variar cada 30° , y la variación del ángulo de elevación se puede seleccionar entre 1, 2 o 5° . La interfaz fue desarrollada de manera que pueda ser utilizada con otros dispositivos fotovoltaicos, como CSS, radiómetros y sensores comerciales.

El equipamiento utilizado para la medición se muestra en la Figura 5.4. El ensayo se llevó a cabo en un ambiente oscuro para evitar que la luz parásita interviniera con la determinación precisa de la respuesta del sensor, con el simulador solar calibrado en condiciones AM0 (1367 W/m^2) como única fuente de luz.

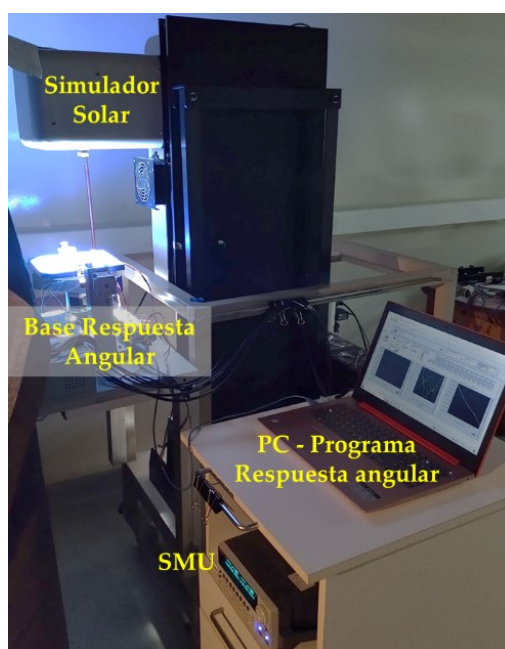


Figura 5.4. Equipamiento utilizado para la medición de respuesta angular: simulador solar, SMU, base electromecánica y programa desarrollado.

El procedimiento de la medición consiste en: primero, posicionar la base en azimut 0° , luego, colocar el sensor en el centro de la base, por último, alinear el eje y del plano del detector con el eje de elevación de la base, como se muestra en la Figura 5.5.

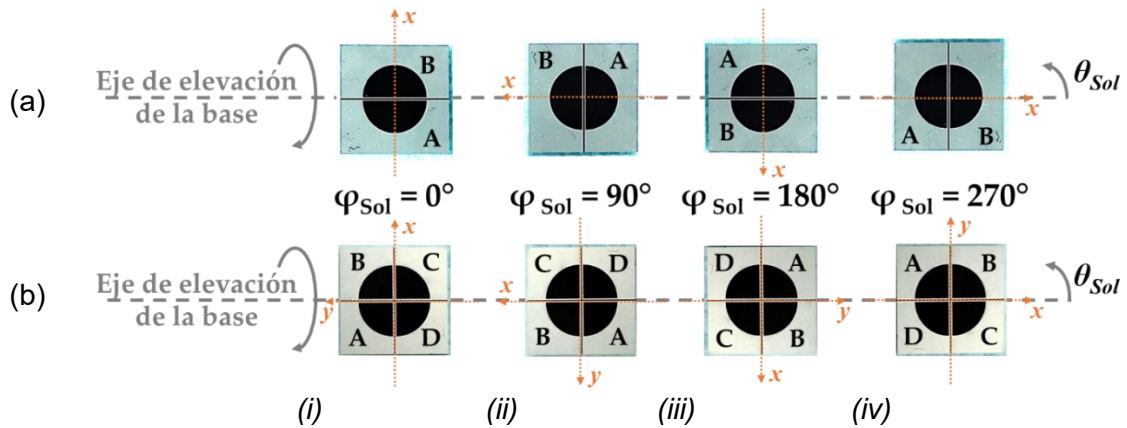


Figura 5.5. Posición del sensor en la base para diferentes ángulos de rotación, (a) con detector de dos cuadrantes y (b) detector de cuatro cuadrantes; (i) $\varphi = 0^\circ$, (ii) $\varphi = 90^\circ$, (iii) $\varphi = 180^\circ$, (iv) $\varphi = 270^\circ$.

Como se mencionó anteriormente, la caracterización eléctrica de respuesta angular consiste en medir la I_{CC} de cada fotodiodo para cada ángulo de elevación y rotación deseado. A diferencia de la caracterización de curva I-V, para esta caracterización se midió en simultáneo la I_{CC} de todos los fotodiodos que conforman el detector. Para esto se utilizaron ambos canales de medición del SMU, como se muestra en la Figura 5.6. La medición se realizó con una conexión de cuatro puntas.

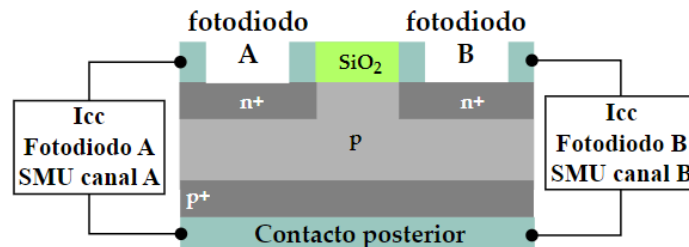


Figura 5.6. Configuraciones de medición en paralelo de la I_{CC} de cada fotodiodo de un detector con dos fotodiodos.

Los detectores seleccionados a partir de las curvas I-V medidas son el 389-06 de dos cuadrantes para el sensor de un eje y el detector 389-27 de cuatro cuadrantes para el sensor de dos ejes.

5.2. Caracterización de la respuesta angular del detector con vidrio

En la caracterización de la respuesta angular del detector con vidrio, el área iluminada de cada fotodiodo no cambia al variar la posición de la fuente de luz y, según lo planteado en la Ec. 2.1, la I_{CC} va a variar de forma proporcional al coseno del ángulo

cenital. Dado que en estas condiciones la I_{CC} no varía con el ángulo azimutal, se realizó la medición solamente en azimut 0° .

Para realizar un análisis de la respuesta al coseno del detector, se normalizó la respuesta angular de cada fotodiodo con respecto a su I_{CC} en $\vartheta = 0^\circ$, y se comparó con la función coseno del ángulo cenital mediante el cálculo del error direccional (Ec. 5.1).

$$\text{Error direccional (\%)} = \left| 1 - \frac{I_{CC}(\theta)}{I_{CC}(\theta = 0^\circ) * \cos(\theta)} \right| * 100\% \quad (5.1)$$

Dado que el soporte diseñado para el sensor tiene una tapa con una abertura cuadrada de 11 mm de lado y 1,5 mm de espesor, al medir el detector con el vidrio, la tapa puede proyectar una sombra sobre el área activa del detector a partir de un cierto ángulo. Esta situación se ilustra en la Figura 5.7, donde se define d_{max} como la distancia máxima en la que la tapa proyecta sombra en el detector sin alcanzar el área activa, evitando así afectar la corriente fotogenerada. El ángulo de elevación, ϑ_i , a partir del cual la tapa empieza a generar sombra, depende del tamaño del área activa de los fotodiodos. Para este análisis, se ha aplicado la Ley de Snell, descrita en la Ec. 2.2.

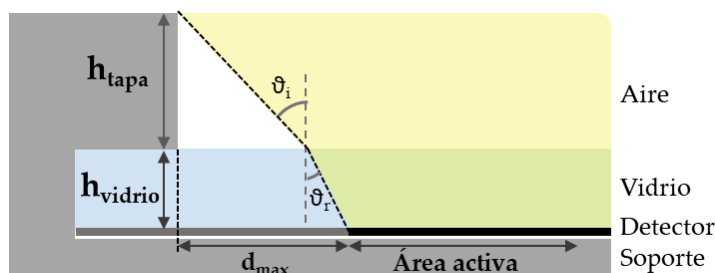


Figura 5.7. Análisis de sombra por la tapa del soporte en el detector con vidrio.

En el caso del detector de dos cuadrantes, donde los fotodiodos tienen un radio de 3,5 mm y el vidrio es de 1 mm de espesor, se calculó que a partir de $\vartheta_i = 40^\circ$, la tapa proyecta una sombra en el área activa de uno de los fotodiodos. En el caso del detector de cuatro cuadrantes, donde el radio de los fotodiodos es de 3,8 mm, se determinó que el área activa se sombrea a partir de aproximadamente $\vartheta_i = 36^\circ$.

La medición de I_{CC} del detector de dos cuadrantes, en función de la elevación de la base cuando φ es 0° , se presenta en la Figura 5.8. La medición se realizó cada 1° de elevación. En el gráfico se observa que, a partir de $\vartheta = 40^\circ$, aparece el efecto de la sombra de la tapa en la I_{CC} del fotodiodo A, mientras que en el B la tapa no produce sombra. Dado que existe un pequeño espacio de aire entre el vidrio y el detector, por el espesor de los contactos metálicos, el ángulo con que incide la luz en el área activa del

detector es el mismo que tiene al incidir sobre el vidrio y, por tanto, no es necesario realizar ninguna corrección al respecto.

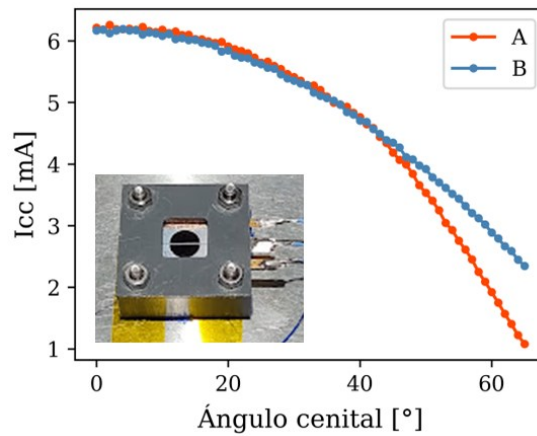


Figura 5.8. Respuesta angular detector de dos cuadrantes con vidrio en $\varphi = 0^\circ$.

En la Figura 5.9(a) se muestran las curvas normalizadas y en líneas puntuadas el coseno del ángulo. En la Figura 5.9(b), se muestra el error direccional entre 0 y 40° , donde se concluye que el error es menor al 2%. Este resultado está en concordancia con los valores reportados de los CSS elaborados en CNEA [74, 75].

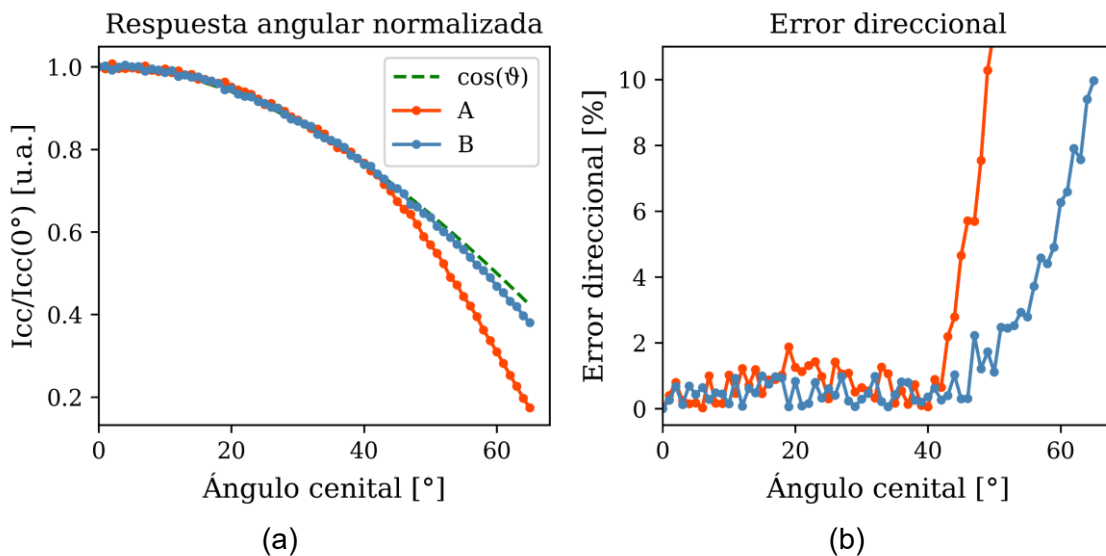


Figura 5.9. (a) Respuesta angular normalizada del detector de dos cuadrantes con vidrio en $\varphi = 0^\circ$, normalizada con respecto de la I_{cc} en $\vartheta = 0^\circ$, (b) error direccional.

En la Figura 5.9, se observa que en el fotodiodo B, donde el área iluminada no está limitada por la tapa del soporte, la respuesta a un ángulo de 60° es menor a la ideal, presentando una diferencia entre 6 y 7% respecto al valor esperado según el coseno. Esta diferencia de la I_{cc} respecto a la respuesta ideal se reflejará en las diferencias con el modelo cuando, además de variar el ángulo de incidencia de la luz en el detector,

también varíe el área iluminada de los fotodiodos. En términos del rango de medición, se hace notar que en $\vartheta = 64^\circ$ la señal ha disminuido un 60% del valor inicial en $\vartheta = 0^\circ$.

En la Figura 5.10, se presenta la caracterización angular del detector de cuatro cuadrantes con vidrio, medida cada 5° de elevación. Se puede ver que, en concordancia con lo calculado, la tapa hace sombra en el área activa a partir de 35° . Para analizar el error direccional, se normalizó la I_{CC} y se comparó con la respuesta con la curva del $\cos(\vartheta)$, como se muestra en la Figura 5.11. Se determinó que el error direccional entre 0 y 35° es menor al 2%, Figura 5.11(b).

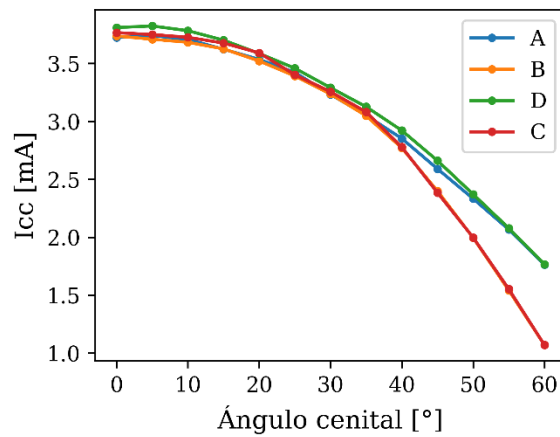


Figura 5.10. Respuesta angular detector de cuatro cuadrantes con vidrio en $\varphi = 0^\circ$.

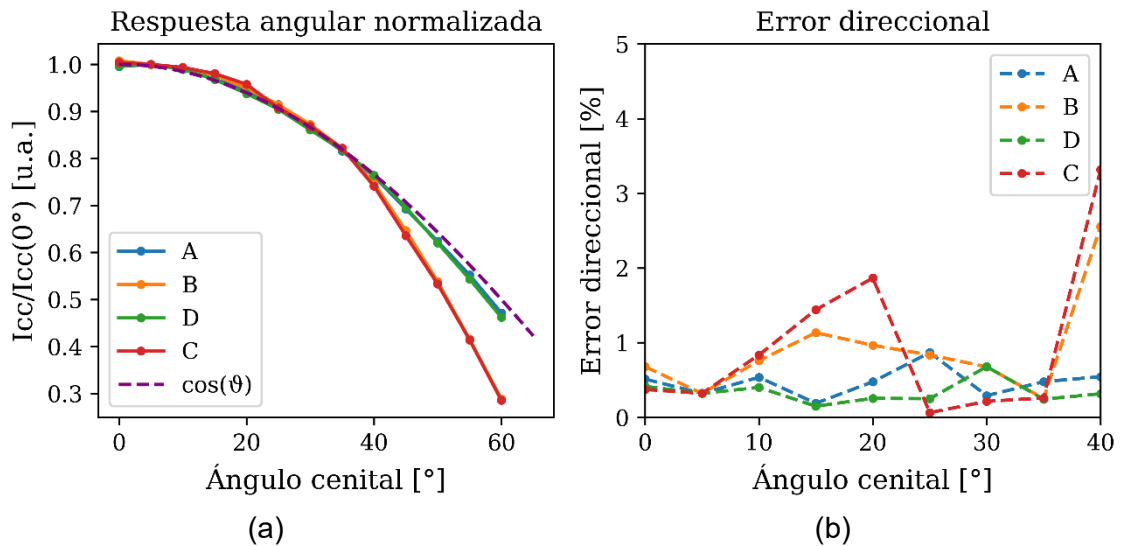


Figura 5.11. (a) Respuesta angular normalizada del detector de cuatro cuadrantes con vidrio, normalizada con respecto de la I_{CC} en $\vartheta=0^\circ$, (b) error direccional.

5.3. Caracterización de la respuesta angular de los sensores integrados

En la medición del sensor integrado, compuesto por el conjunto detector y ventana, el área iluminada en cada fotodiodo depende tanto del ángulo de elevación como del de rotación de la base, por lo que se realizaron mediciones variando ambos ángulos.

La primera parte de esta sección se centra en el análisis y determinación, a partir de mediciones realizadas, de la posición de la base donde la luz incide de forma normal en el detector. En base a dicho análisis, en la segunda parte de esta sección se presentan los resultados de la caracterización de respuesta angular de los sensores de uno y dos ejes elaborados, barriendo los diferentes ángulos cenital y azimutal.

5.3.1. Determinación de la incidencia normal de la luz en el sensor

Para determinar la posición de la base donde la radiación incidente es normal al plano del sensor, se partió de la hipótesis de que cuando la fuente de luz incide de forma normal en el sensor, $\vartheta = 0^\circ$, el área iluminada en cada fotodiodo del detector se mantiene constante para todo ángulo azimutal y por tanto la I_{CC} de cada fotodiodo se va a mantener constante en toda la serie de medición.

Para determinar la alineación entre la fuente de luz y la base, se realizaron mediciones del sensor con detector de dos cuadrantes, se utilizó la ventana cuadrada y la ventana circular para verificar que en ambas configuraciones coincide el 0° cenital. Se realizaron mediciones cada 1° entre -5 y 5° de elevación con respecto a la horizontal y cada 30° entre 0 y 360° de rotación de la base. Para simplificar el análisis de los datos, las mediciones se organizaron en series, donde cada serie se corresponde con un ángulo de elevación de la base y está compuesta por la I_{CC} medida en cada ángulo de rotación para cada elevación. La serie 1 se corresponde con la medición a -5° con respecto a la horizontal y la serie 6 con la horizontal. De cada serie de medición se calculó la media ($\overline{I_{CC}}$) y la desviación estándar ($\sigma_{I_{CC}}$). A partir de estos valores, se calculó el coeficiente de variación (C_V) de cada serie de medición según la Ec. 5.2, que indica el tamaño de la desviación en relación con la media.

$$C_V = \frac{\sigma_{I_{CC}}}{\overline{I_{CC}}} * 100\% \quad (5.2)$$

En la Figura 5.12, se presentan las mediciones utilizando diagramas de caja y bigotes, donde los bigotes representan la varianza de los datos. Solo se muestran las primeras seis series, entre -5° y la horizontal, porque en este intervalo se pudo identificar la

posición de incidencia normal, donde los datos presentaron menor varianza. Se observa que, en todos los casos, la serie número 3 es la que presentó menor varianza.

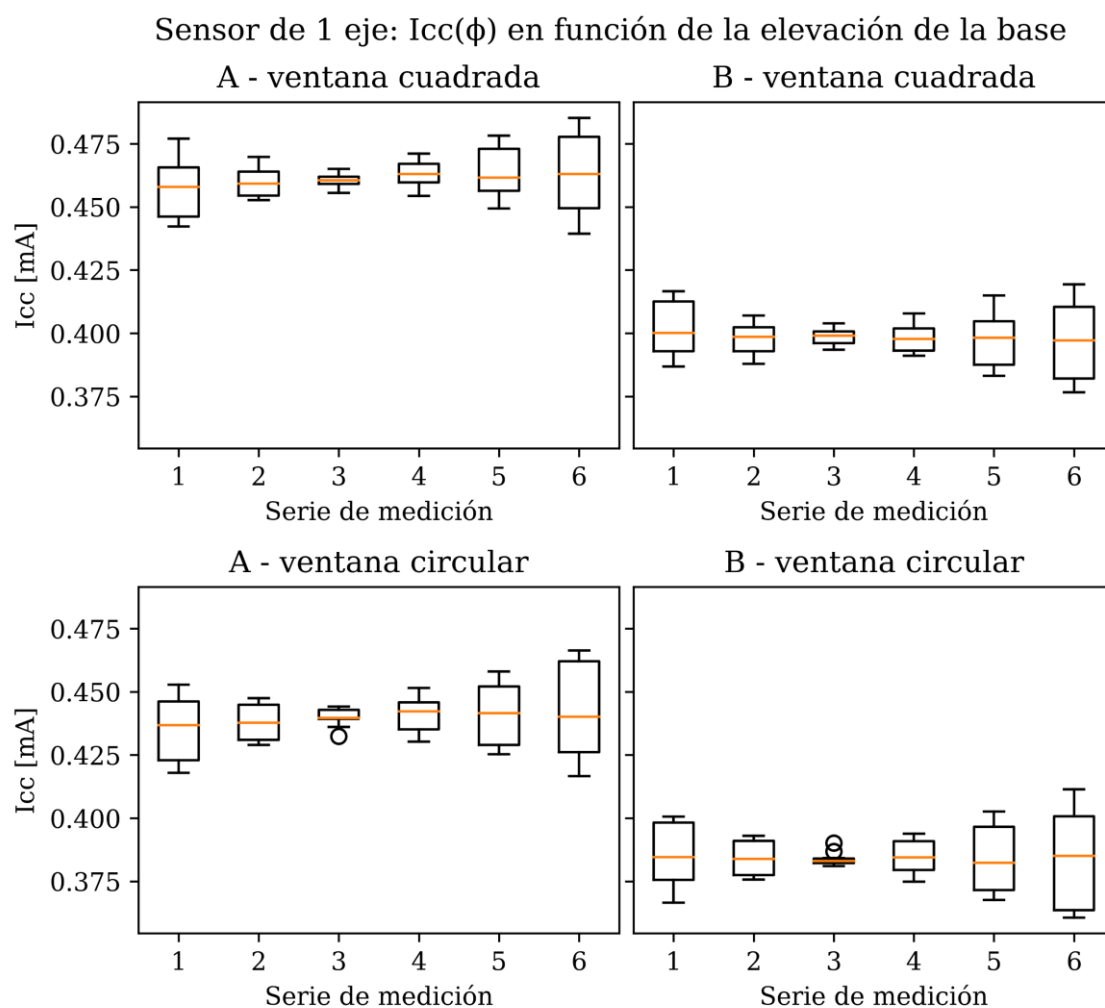


Figura 5.12. Distribución en diagrama de caja y bigotes de las series de medición de I_{cc} del detector de dos cuadrantes, al utilizar la ventana cuadrada y la circular, variando el ángulo de elevación y rotación de la base para determinar la incidencia normal $\vartheta = 0^\circ$.

Los valores calculados de la serie 3 se muestran en la Tabla 5.1 y se concluye que la serie 3, que se corresponde con -2° con respecto de la horizontal, se corresponde con el ángulo cenital $\vartheta_i = 0^\circ$ del arreglo experimental.

Tabla 5.1. Estadística de los valores medidos en $\vartheta = 0^\circ$ del sensor de un eje.

	Ventana circular		Ventana cuadrada	
	Fotodiodo A	Fotodiodo B	Fotodiodo A	Fotodiodo B
$\overline{I_{cc}}$ [μA]	440	384	461	399
$\sigma_{I_{cc}}$ [μA]	3,2	2,5	3,0	3,0
C_v [%]	0,7 %	0,7 %	0,7 %	0,7 %

Este análisis también se realizó con el sensor de dos ejes con detector de cuatro cuadrantes. Los resultados se muestran en la Figura 5.13, donde se observa que nuevamente la serie 3 es la que presenta la menor variación en sus valores.

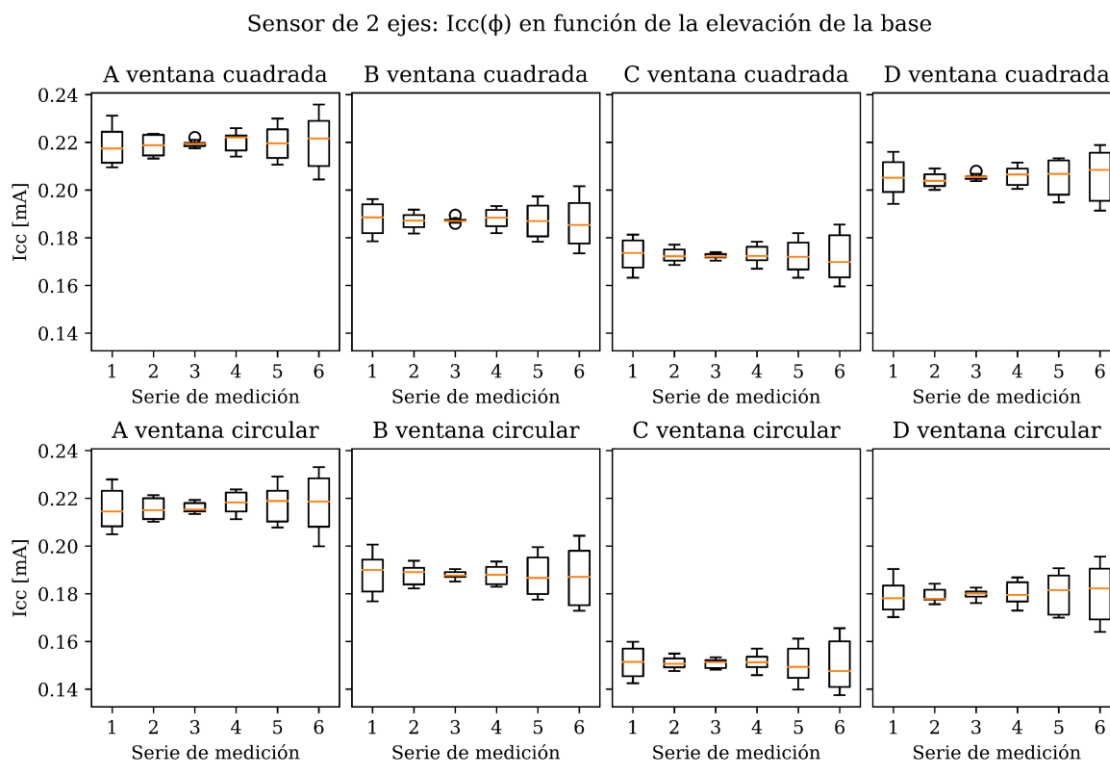


Figura 5.13. Distribución en diagrama de caja y bigotes de las series de medición de I_{CC} del detector de cuatro cuadrantes, al utilizar una ventana cuadrada y una circular, variando el ángulo de elevación y rotación de la base para determinar $\vartheta_i = 0^\circ$.

De esta forma, se reafirma la conclusión de que los datos medidos se deben ajustar a que la tercera serie de medición se corresponde con la incidencia normal de la luz en el sensor, $\vartheta_i = 0^\circ$.

En la Tabla 5.2 se muestran el valor medio de la I_{CC} de cada fotodiodo y su desviación estándar cuando $\vartheta_i = 0^\circ$, serie 3 del sensor de dos ejes con detector de cuatro cuadrantes al utilizar la ventana cuadrada y la circular.

Tabla 5.2. Estadística de los valores medidos en $\vartheta = 0^\circ$ del sensor de dos ejes.

	Ventana circular				Ventana cuadrada			
	A	B	C	D	A	B	C	D
$\overline{I_{CC}} [\mu A]$	216	188	151	180	219	187	172	206
$\sigma_{I_{CC}} [\mu A]$	2,0	1,7	1,7	2,0	1,3	0,9	1,0	1,1
C_v [%]	0,9	1,15	1,1	0,9	0,45	0,6	0,5	0,6

Las diferencias observadas en todos los sensores medidos en la I_{CC} entre fotodiodos en $\vartheta = 0^\circ$ sugieren que puede existir un error de alineación entre la ventana y el detector.

5.3.2. Respuesta angular de los sensores

En esta sección, se presentan los resultados de las mediciones realizadas al variar la posición de la fuente de luz en intervalos de 1° entre 0 y 50° del ángulo cenital, así como cada 30° entre 0° y 360° del azimutal. En la Figura 5.14 se muestran las mediciones de la I_{CC} de ambos fotodiodos del sensor con detector de dos cuadrantes, con las dos geometrías de ventana diseñadas.

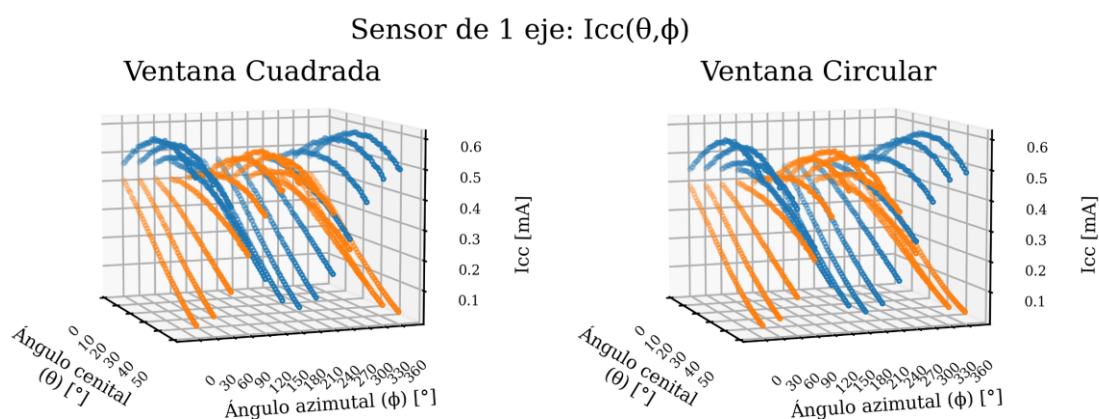


Figura 5.14. Respuesta angular de la I_{CC} de cada fotodiodo del sensor de un eje con ventana cuadrada (izquierda) y circular (derecha), fotodiodo A en azul y B en naranja.

De los gráficos se concluye que, el comportamiento de la respuesta angular es el esperado para el sensor de un eje. En azimut 0° , al incrementar el ángulo cenital, la I_{CC} del fotodiodo A aumenta, mientras que la del B disminuye, y los valores máximos se obtienen en $\varphi = 0^\circ$ para A y en $\varphi = 180^\circ$ para B. La I_{CC} medida se encuentra en un rango de $600 \mu\text{A}$. Se observa que, en ambas configuraciones, la I_{CC} de los fotodiodos difieren cuando $\vartheta = 0^\circ$, ver la Tabla 5.1. La comparación entre ambas geometrías de ventana se realizó en el Capítulo 2 “Diseño y simulación de sensores solares finos”.

Por otro lado, las mediciones del sensor de dos ejes con detector de cuatro cuadrantes y ventana cuadrada se presentan en la Figura 5.15, mientras que las mediciones obtenidas con la ventana circular se muestran en la Figura 5.16. La respuesta angular de cada fotodiodo se comporta de la forma esperada, la I_{CC} en cada caso alcanza su valor máximo en el ángulo azimutal esperado.

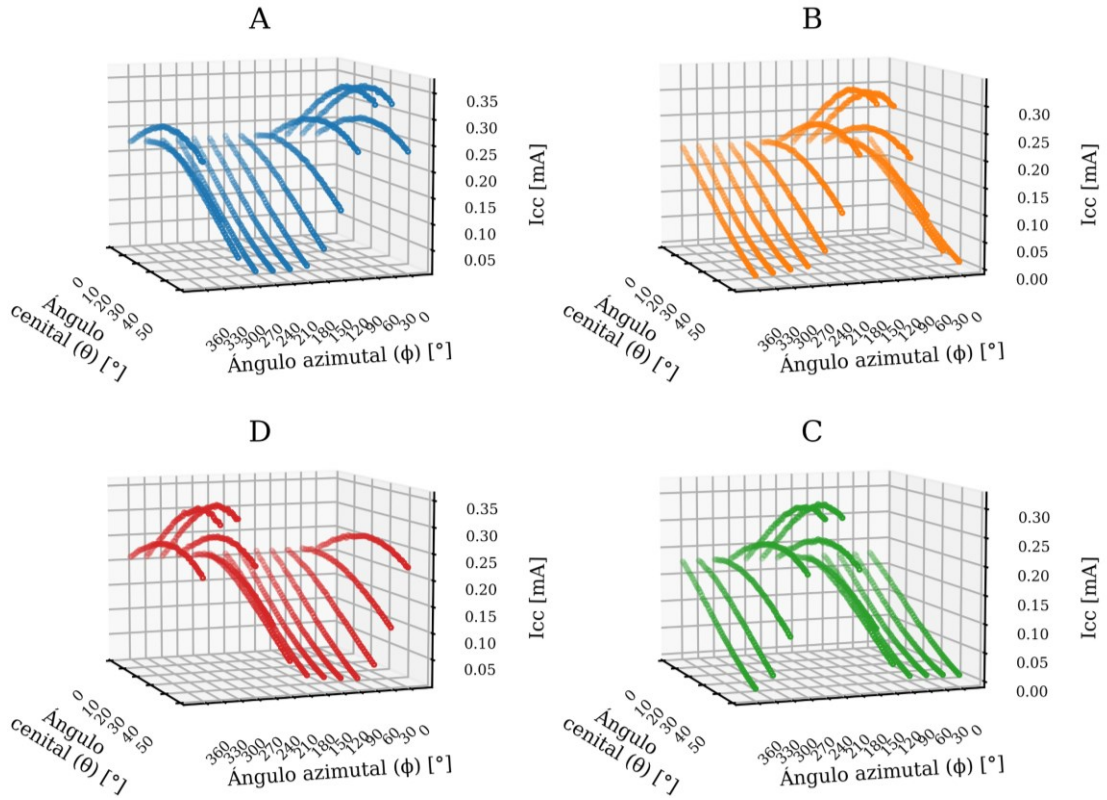


Figura 5.15. Respuesta angular de la I_{cc} de cada fotodiodo del sensor de dos ejes con ventana cuadrada.

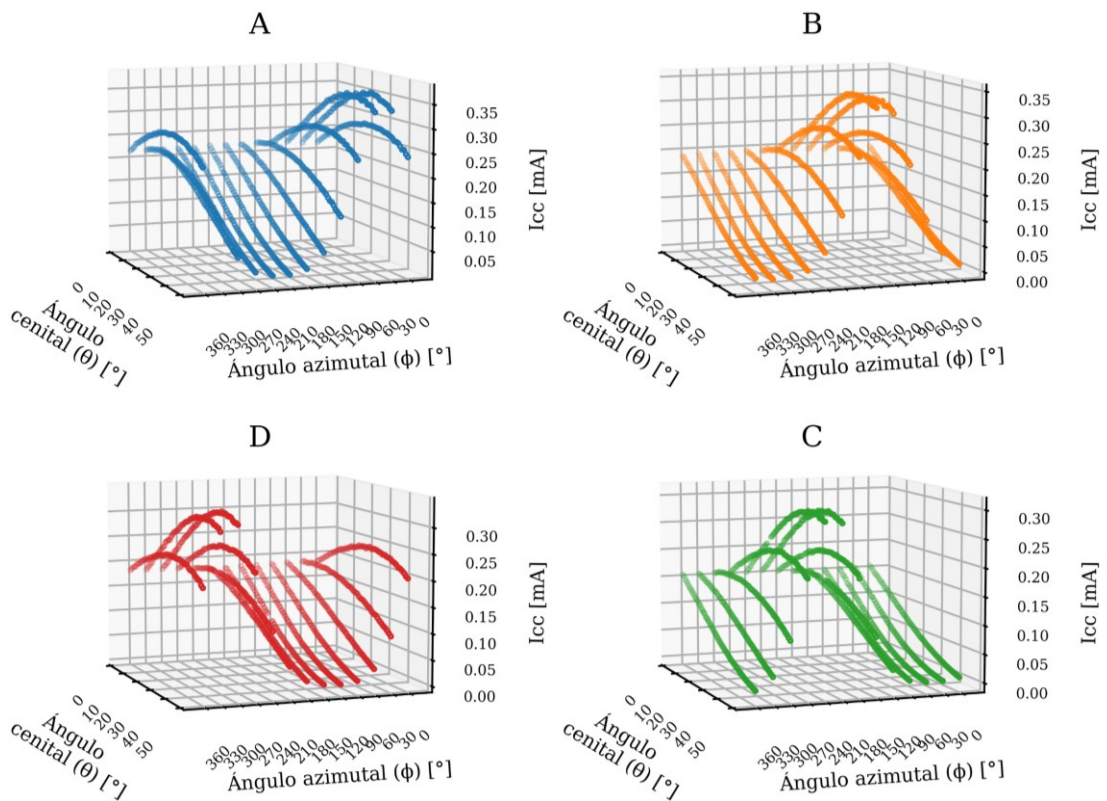


Figura 5.16. Respuesta angular de la I_{cc} de cada fotodiodo del sensor de dos ejes con ventana circular.

A partir de las mediciones realizadas se obtuvo la función de transferencia H de cada sensor. Las funciones de transferencia se obtuvieron comparando las corrientes según se planteó en la Ec. 2.16 para el sensor de un eje con el detector de dos cuadrantes y las Ec. 2.24 y 2.25 para el sensor de dos ejes con el detector de cuatro cuadrantes.

En la Figura 5.17 se presenta la función de transferencia del sensor de un eje con ventanas cuadrada y circular. Como se puede ver en los gráficos, el sensor de un eje no es sensible a variaciones de la posición del Sol en el eje perpendicular al eje de medición: en azimut 90° y 270° , H es una constante para todo ϑ .

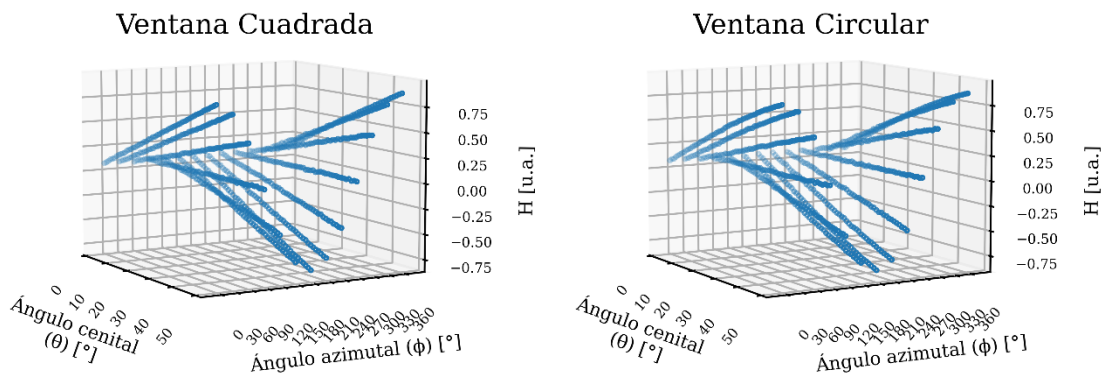
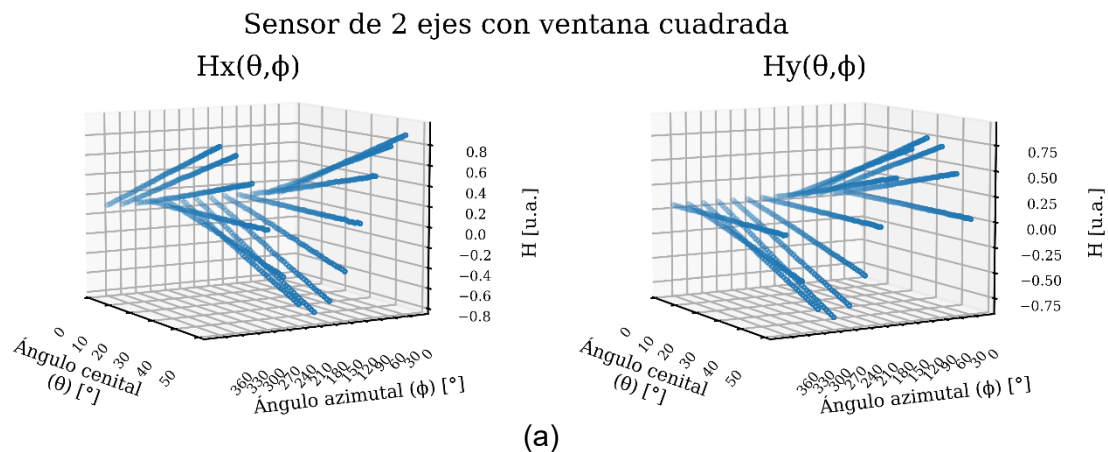


Figura 5.17. Función de transferencia del sensor de un eje fabricado, con ventana cuadrada y con ventana circular.

Por otro lado, en la Figura 5.18(a) se presentan las funciones de transferencia del sensor de dos ejes al utilizar una ventana cuadrada y en la Figura 5.18(b) al utilizar una ventana circular. De forma general, se puede observar que la función de transferencia con la ventana circular es menos lineal que con la ventana cuadrada.



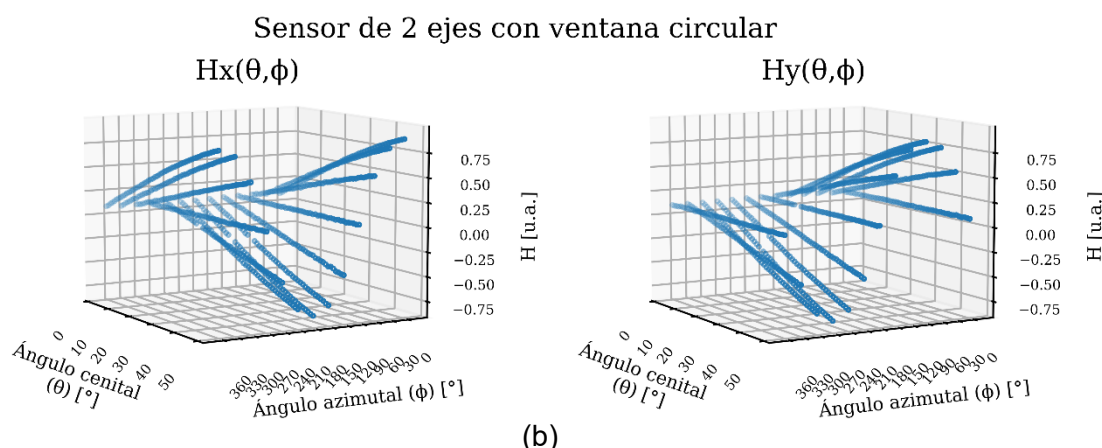


Figura 5.18. Funciones de transferencia de cada eje de medición del sensor de dos ejes, con ventanas (a) cuadrada y (b) circular.

Para corroborar si la respuesta obtenida se ajusta a la esperada, dado que las curvas no son triviales, se realiza en la próxima sección una comparación de la respuesta medida con la simulada.

5.4. Comparación de la respuesta angular medida con la simulada

Para simular la respuesta de cada sensor, siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 2.5, es necesario conocer la J_{CC} de cada fotodiodo. Además, es importante determinar si hay error de alineación entre la ventana y el detector. Para un mejor análisis de la respuesta obtenida, se realiza una comparación únicamente en casos particulares. Los ángulos de interés son las posiciones azimutales 0° , 90° , 180° y 270° . Se comparan con la simulación tanto la I_{CC} como la función de transferencia.

5.4.1. Determinación de la J_{CC} y el error de alineación entre la ventana y el detector

Debido a la naturaleza experimental del proceso de elaboración de los distintos componentes del sensor, pueden existir errores en la alineación durante la integración, por lo que el área iluminada en $\vartheta = 0^\circ$ puede diferir del valor de diseño.

Para determinar si hay error de alineación se tomó el criterio de que la razón entre las I_{CC} de los fotodiodos del detector se debería mantener igual en las diferentes configuraciones, descubierto, con vidrio y con la ventana, dado que, de estar correctamente alineados, en $\vartheta = 0^\circ$ el área iluminada sería igual en todos los fotodiodos.

En la Tabla 5.3, se muestran los valores de la I_{CC} en $\vartheta = 0^\circ$ del sensor de un eje en las diferentes condiciones, así como la razón entre las corrientes. Se obtuvo que la razón entre las corrientes del detector de dos cuadrantes sin vidrio y con vidrio es en promedio 0,98, mientras que con las ventanas es 0,87. Debido a que hay diferencias en la razón obtenida con ventana y sin ventana, se concluyó que hay un error de alineación entre la ventana y el detector.

Tabla 5.3. I_{CC} en $\vartheta = 0^\circ$, razón entre fotodiodos del sensor de un eje: descubierto, con vidrio y con ventanas.

	Sin vidrio [mA]	Con vidrio [mA]	Ventana cuadrada [μA]	Ventana circular [μA]
I_{CC}^A	6,8	6,4	461	440
I_{CC}^B	6,7	6,2	400	384
I_{CC}^B/I_{CC}^A	0,98	0,98	0,87	0,87

En el sensor de un eje solo es necesario calcular el error en x , e_x . Por otro lado, como la razón entre fotodiodos es igual para ambas geometrías de la ventana, se espera que el error de alineación sea similar con las dos ventanas.

En el caso del sensor de dos ejes con detector de cuatro cuadrantes, para determinar si existe error de alineación entre la ventana y el detector, se analizó la relación entre la I_{CC} de cada fotodiodo contra la de uno de los fotodiodos, siendo la I_{CC} del fotodiodo A la seleccionada como referencia, dado que es el que tiene mayor corriente del detector descubierto y con vidrio. La relación entre fotodiodos se analizó para las dos geometrías de ventana, y se comparó con la relación que hay entre dichos fotodiodos en la medición del detector descubierto y con vidrio, como se presenta en la Tabla 5.4. En la tabla se observa que hay diferencias en la razón obtenida con ventana y sin ventana, por citar un ejemplo en el caso del fotodiodo C, la relación con el fotodiodo A pasa de 0,96 con vidrio a 0,70 y 0,79 con las ventanas circular y cuadrada, respectivamente.

Tabla 5.4. Razón entre la I_{CC} de cada fotodiodo del detector de cuatro cuadrantes.

Diodo	Sin vidrio		Con vidrio		Ventana circular		Ventana cuadrada	
	I_{CC} [mA]	I_{CC}/I_{CC}^A	I_{CC} [mA]	I_{CC}/I_{CC}^A	I_{CC} [μA]	I_{CC}/I_{CC}^A	I_{CC} [μA]	I_{CC}/I_{CC}^A
A	4,2	1,00	3,9	1,00	216	1,00	219	1,00
B	4,0	0,96	3,8	0,96	188	0,87	187	0,85
C	4,1	0,97	3,8	0,96	151	0,70	172	0,79
D	4,1	0,98	3,9	0,98	180	0,83	205	0,94

A partir de esta observación, se determinó que existe un error de alineación entre la ventana y el detector en el detector de dos ejes. En el caso del detector de cuatro

cuadrantes hay que considerar que la medición se puede ver afectada por un error en x , e_x , y error en y , e_y .

La premisa es que, con las mediciones realizadas y el modelo del sensor, es posible calcular el error de alineación entre la ventana y el detector. Por un lado, con la ventana cuadrada, la geometría de la ventana tiene la ventaja de que el área total iluminada en el detector es constante e independiente del error de alineación y esto se puede aprovechar para determinar analíticamente el error de alineación. Por otro lado, con la ventana circular, el área total iluminada en el detector depende del corrimiento de la ventana, por lo que en este caso se determinó el error de forma numérica, iterando. A continuación, se presenta el análisis realizado para cada geometría de la ventana en cada sensor.

5.4.1.1. Cálculo del error de alineación entre la ventana cuadrada y el detector de dos cuadrantes

Para obtener el área iluminada en cada fotodiodo del detector de dos cuadrantes en $\vartheta = 0^\circ$ al utilizar la ventana cuadrada de 1,8 mm de lado, se realizaron los siguientes planteos.

En primer lugar, a partir del modelo del sensor (Ec 2.10 y 2.11) se calculó que cuando $L_x = 0$ mm, con $r = 0,9$ mm y $s = 350$ μm , ver Figura 2.6, la suma de las áreas iluminadas en cada fotodiodo es $1,3$ mm^2 . De esta forma queda definida la Ec. 5.3.

$$A_{ilum}^A + A_{ilum}^B = 2 * 1,3 \text{ mm}^2 \quad (5.3)$$

Por otro lado, de la Tabla 5.3, se obtiene que la razón entre las J_{CC} del detector con vidrio es:

$$J_{CC}^B = 0,98 * J_{CC}^A \quad (5.4)$$

Luego, a partir de las mediciones de I_{CC} realizadas con la ventana cuadrada, Tabla 5.1, y la relación entre la I_{CC} y la J_{CC} , se definen las Ec. 5.5 y 5.6.

$$A_{ilum}^A * J_{CC}^A = 461 \mu\text{A} \quad (5.5)$$

$$A_{ilum}^B * J_{CC}^B = 399 \mu\text{A} \quad (5.6)$$

Con las Ec. 5.3 a 5.6, se puede calcular el área iluminada y la J_{CC} de cada fotodiodo. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Valores calculados de J_{CC} y área iluminada del sensor de un eje con ventana cuadrada.

Sensor de un eje	Área iluminada [mm ²]	J_{CC} [mA/mm ²]
A	1,38	0,33
B	1,23	0,32

Para determinar el error de alineación, se analizó la diferencia entre el área iluminada calculada a partir de los valores medidos y el área iluminada calculada mediante el modelo, sin considerar el error de alineación. Este delta de área iluminada se define en la Ec. #5.7, como el área definida por el error de alineación y el lado de la ventana.

$$\Delta A_{ilum}^A(\theta = 0^\circ) = A_{ilum}^{A \text{ calculada}} - A_{ilum}^{A \text{ simulada}} = error_{Lx} * 1,8 \text{ mm} \quad (5.7)$$

Con esta ecuación, se calculó que el error de alineación e_x es de 39 μm , en el sentido negativo del eje x en el sistema de referencia de la ventana.

5.4.1.2. Cálculo del error de alineación entre la ventana cuadrada y el detector de cuatro cuadrantes

A continuación, se presenta el análisis realizado para obtener el área iluminada en cada fotodiodo del detector de cuatro cuadrantes al utilizar la ventana cuadrada de 1,8 mm de lado cuando $\vartheta = 0^\circ$.

Similar a lo realizado con el detector de dos cuadrantes, se comenzó por utilizar el modelo del sensor (Ec. 2.26 a 2.29) para calcular el área total iluminada en el detector cuando L_x y L_y son 0 mm. Se consideró que $r = 0,9$ mm y $s = 350$ μm , ver Figura 2.16, y se obtuvo que el área iluminada en cada fotodiodo es 0,53 mm² y se definió la Ec. 5.8.

$$A_{ilum}^A + A_{ilum}^B + A_{ilum}^C + A_{ilum}^D = 4 * 0,53 \text{ mm}^2 \quad (5.8)$$

Luego, con los valores informados en la Tabla 5.4 para el detector con vidrio se plantearon las siguientes relaciones:

$$J_{CC}^B = 0,96 * J_{CC}^A \quad (5.9)$$

$$J_{CC}^C = 0,96 * J_{CC}^A \quad (5.10)$$

$$J_{CC}^D = 0,98 * J_{CC}^A \quad (5.11)$$

Por último, a partir de las mediciones de I_{CC} realizadas con la ventana cuadrada (Tabla 5.4) y la relación entre la I_{CC} y la J_{CC} , se definieron las siguientes ecuaciones:

$$A_{ilum}^A * J_{CC}^A = 216 \mu\text{A} \quad (5.12)$$

$$A_{ilum}^B * J_{CC}^B = 188 \mu A \quad (5.13)$$

$$A_{ilum}^C * J_{CC}^C = 172 \mu A \quad (5.14)$$

$$A_{ilum}^D * J_{CC}^D = 205 \mu A \quad (5.15)$$

A partir de las Ec. 5.8 a 5.15, se calculó la J_{CC} y el área iluminada de cada fotodiodo. Los resultados se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Valores calculados de J_{CC} y área iluminada del sensor de dos ejes con ventana cuadrada.

Fotodiodo	Área iluminada [mm^2]	J_{CC} [mA/mm^2]
A	0,58	0,38
B	0,51	0,37
C	0,47	0,37
D	0,55	0,38

Para determinar el error de alineación, de forma similar al análisis realizado para el detector de dos cuadrantes, se analizó la diferencia entre el área iluminada calculada a partir de los valores medidos y el área iluminada calculada mediante el modelo, sin considerar el error de alineación. Para simplificar el análisis, se agrupó el área de los fotodiodos A y C, dado que la diferencia entre la simulación y la medición solo se ve afectada por el error en x, mientras que en la suma del área iluminada de los fotodiodos A y B, la diferencia entre lo simulado y lo medido es proporcional al error de alineación en y. El error en cada eje se calculó a partir de las Ec. 5.16 y 5.17, se obtuvo un error en x de 49 μm y en y de 23 μm .

$$(A_{ilum}^{B \text{ simulada}} + A_{ilum}^{C \text{ simulada}}) - (A_{ilum}^{B \text{ calculada}} + A_{ilum}^{C \text{ calculada}}) = error_{Lx} * (2r - s) \quad (5.16)$$

$$(A_{ilum}^{A \text{ simulada}} + A_{ilum}^{B \text{ simulada}}) - (A_{ilum}^{A \text{ calculada}} + A_{ilum}^{B \text{ calculada}}) = error_{Ly} * (2r - s) \quad (5.17)$$

5.4.1.3. Cálculo del error de alineación de la ventana circular con el detector de dos cuadrantes

Al utilizar una ventana circular, el área total iluminada en $\vartheta = 0^\circ$ depende del error en la alineación entre la ventana y el detector. Por esta razón se tomó otro enfoque para determinar el error de alineación.

Primeramente, con las mediciones de $\overline{I_{CC}}$ de la Tabla 5.1, se definieron las ecuaciones:

$$A_{ilum}^A * J_{CC}^A = 0,44 \text{ mA} \quad (5.18)$$

$$A_{ilum}^B * J_{CC}^B = 0,3836 \text{ mA} \quad (5.19)$$

Luego, se planteó la razón entre las Ec. 5.18 y 5.19, teniendo en cuenta que la Ec. 5.4 (5.4 es válida para ambas geometrías de la ventana, y queda definida la ecuación 5.20:

$$\frac{A_{illum}^A}{A_{illum}^B} = \frac{0,98 * 0,3836 \text{ mA}}{0,44 \text{ mA}} = 1,124 \quad (5.20)$$

Con estas tres condiciones, se iteró el modelo propuesto del área iluminada para diferentes valores de e_x , hasta encontrar el valor para el cual se cumple la condición definida en la Ec. 5.20. Con este método se obtuvo que el error en x , e_x , es de $36 \mu\text{m}$.

En la Tabla 5.7 se presentan la J_{CC} y el área iluminada en $\vartheta = 0^\circ$ de cada fotodiodo, al utilizar la ventana circular elaborada, considerando el error de alineación en x de $36 \mu\text{m}$, similar al calculado para la ventana cuadrada.

Tabla 5.7. Valores calculados de J_{CC} y área iluminada del sensor de un eje con ventana circular, considerando un error de alineación de $39 \mu\text{m}$ en x .

Fotodiodo	Área iluminada [mm^2]	J_{CC} [mA/mm^2]
A	1,30	0,34
B	1,15	0,33

5.4.1.4. Cálculo del error de alineación de la ventana circular con el detector de cuatro cuadrantes

A partir de las mediciones de I_{CC} realizadas del detector de cuatro cuadrantes con la ventana circular y la relación entre la I_{CC} y la J_{CC} , se definieron las siguientes ecuaciones:

$$A_{illum}^A * J_{CC}^A = 216 \mu\text{A} \quad (5.21)$$

$$A_{illum}^B * J_{CC}^B = 188 \mu\text{A} \quad (5.22)$$

$$A_{illum}^C * J_{CC}^C = 151 \mu\text{A} \quad (5.23)$$

$$A_{illum}^D * J_{CC}^D = 180 \mu\text{A} \quad (5.24)$$

Luego, se utilizaron las relaciones planteadas en las Ec. 5.9 a 5.11 para simplificar las incógnitas de la densidad de corriente de cada fotodiodo y, se plantearon las siguientes relaciones entre el área iluminada de cada fotodiodo en $\vartheta = 0^\circ$ con respecto del fotodiodo A:

$$\frac{A_{illum}^B}{A_{illum}^A} = 0,90 \quad (5.25)$$

$$\frac{A_{illum}^C}{A_{illum}^A} = 0,72 \quad (5.26)$$

$$\frac{A_{illum}^D}{A_{illum}^A} = 0,85 \quad (5.27)$$

Con estas condiciones, se iteró el modelo propuesto del área iluminada para encontrar los valores de e_x y e_y que satisfacen las condiciones planteadas, pero no se encontraron valores de e_x y e_y que satisficieran todas las condiciones, los más cercanos son $33 \mu\text{m}$ en x , y $-54 \mu\text{m}$ en y . Esto se puede deber a que las mediciones con ventana y con vidrio son de diferentes días, para minimizar los errores experimentales se recomienda que para el trabajo futuro se realicen ambas mediciones el mismo día. Los valores calculados de J_{CC} se muestran en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Valores calculados de J_{CC} y área iluminada del sensor de dos ejes con ventana circular, considerando un error de alineación de $33 \mu\text{m}$ en x y de $-54 \mu\text{m}$ en y .

Fotodiodo	Área iluminada [mm^2]	J_{CC} [mA/mm^2]
A	0,54	0,40
B	0,48	0,40
C	0,40	0,38
D	0,45	0,40

5.4.2. Comparación del sensor de un eje con la simulación

Para realizar la comparación de la respuesta medida con la simulada se analizaron los casos de interés cuando el Sol se encuentra en las posiciones azimutales 0° , 90° , 180° y 270° . En estos casos, como se mostró en la Figura 5.5, el eje de elevación de la base es paralelo o perpendicular a la separación entre fotodiodos, coincidiendo con uno de los ejes de medición del sensor.

En primer lugar, se tuvo en cuenta que, en el caso del sensor de un eje con detector de dos cuadrantes, cuando el ángulo azimutal es 90° o 270° , el eje de elevación es perpendicular a la separación entre fotodiodos, como se mostró en la Figura 5.5(a)(ii) y (iv), por lo tanto, al variar el ángulo cenital, el área iluminada en cada fotodiodo se va a mantener constante y la I_{CC} va a variar de forma proporcional al coseno del ángulo cenital.

En la Figura 5.19(a), se muestra la I_{CC} medida y se compara con la respuesta al coseno simulada, donde se utilizó el valor medio de la I_{CC} en $\vartheta = 0^\circ$ de la Tabla 5.1. En los gráficos de la I_{CC} se añadieron, en líneas discontinuas, las curvas simuladas considerando un error de $\pm 0,5^\circ$ en la determinación del 0° de elevación. Además, se

calculó el error direccional empleando la Ec. 5.1 y el resultado se muestra en la Figura 5.19(b). El error calculado está en el orden del obtenido para el detector con vidrio en la Figura 5.9(b).

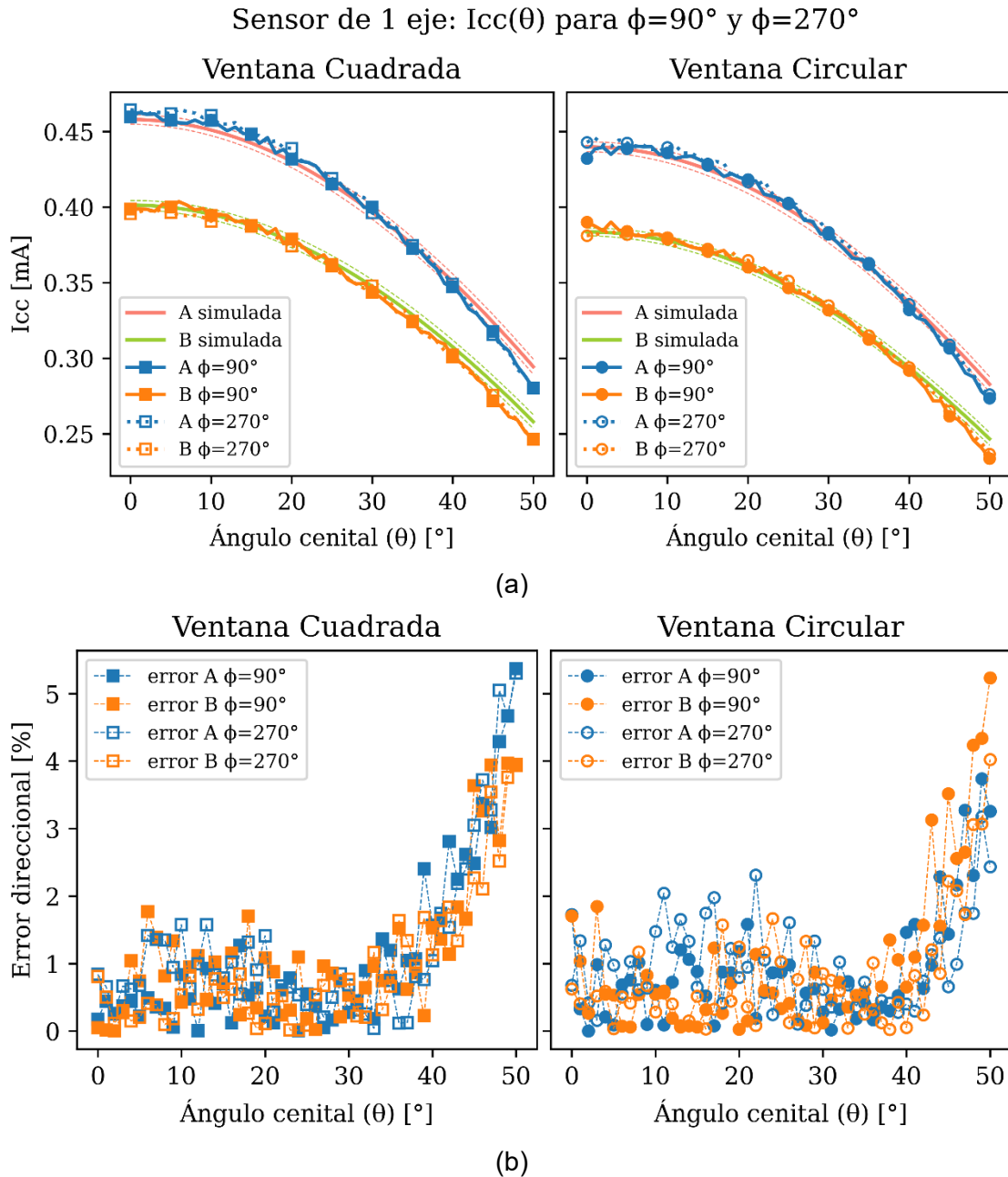


Figura 5.19. Respuesta angular del sensor de un eje en azimut 90° y 270° , (a) respuesta de al coseno de la I_{cc} , (b) error direccional.

La otra posición de interés es cuando el ángulo azimutal es 0° o 180° , ya que el eje de elevación está alineado con la separación entre fotodiodos y coincide con el eje de medición del sensor de un eje, como se mostró en la Figura 5.5(a)(i) y (iii).

En la Figura 5.20, se presenta la comparación de la I_{CC} medida del sensor de un eje con detector de dos cuadrantes con la respuesta simulada del modelo del sensor. La comparación se realiza para ambas geometrías de la ventana, circular y cuadrada, y se consideró la J_{CC} y el error de alineación previamente determinados en la Tabla 5.5 y la Tabla 5.7. En los gráficos se añadieron, en líneas discontinuas, las curvas simuladas considerando un error de $\pm 0,5^\circ$ en el 0° de elevación de la base.

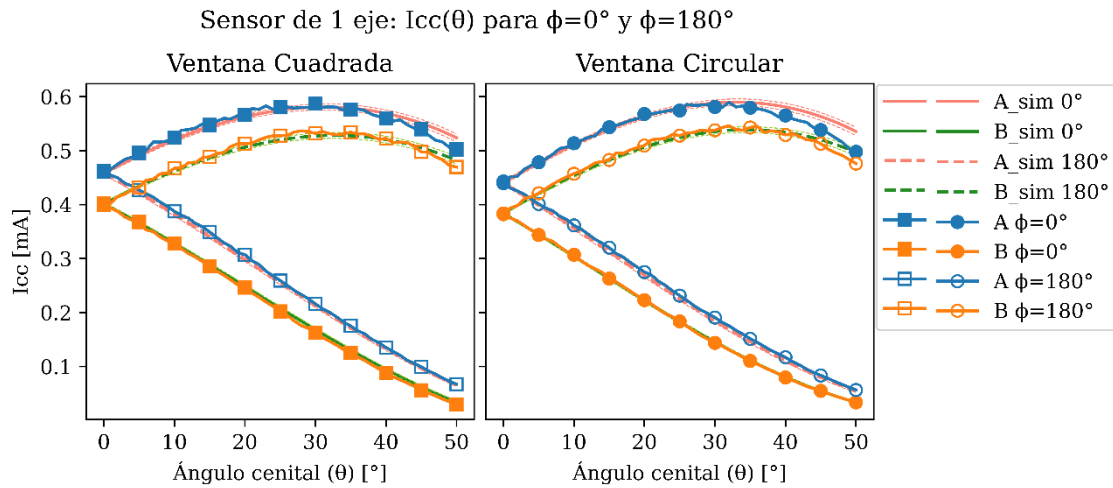


Figura 5.20. Comparación de la I_{CC} medida con la simulada, en $\varphi = 0^\circ$ y 180° , del sensor de un eje con ventana cuadrada y ventana circular.

En los resultados con la ventana cuadrada, se observan pequeñas diferencias entre la medición y el modelo, que se pueden atribuir a un posible error de paralelismo entre la línea media de separación entre fotodiodos y el borde de la ventana, lo cual se puede interpretar como que la ventana está ligeramente rotada con respecto al detector. En este caso la geometría definida por la ventana en cada fotodiodo no es exactamente un rectángulo como en el modelo planteado. Por otro lado, con la ventana circular la respuesta medida se ajusta mejor al modelo. Es importante mencionar que, a diferencia de la ventana cuadrada, con la ventana circular se mitigan los posibles errores de alineación en la rotación entre el detector y la ventana gracias a su simetría de rotación.

En ambos gráficos se observa que en el fotodiodo A, en $\varphi = 0^\circ$ y a partir de $\vartheta = 35^\circ$, la medición se separa del modelo, mientras que en el fotodiodo B, esto ocurre a partir de $\vartheta = 45^\circ$. Esta diferencia se atribuye al error direccional mostrado en la Figura 5.19(b).

En la Figura 5.21, se presenta la comparación de las funciones de transferencia, la calculada a partir de las mediciones y la simulada para el sensor de un eje con detector de dos cuadrantes, con ventanas cuadrada y circular. La función de transferencia se obtiene al comparar la I_{CC} de cada fotodiodo normalizado por la suma de la I_{CC} de todos

los fotodiodos, como se definió previamente en la Ec. 2.16. Se muestran solamente los dos casos de interés mencionados, cuando el ángulo azimutal es 0° y 180° .

Se observa que, a diferencia de la Figura 5.20, donde se observó una desviación de la respuesta medida con la simulada a partir de 35° , en la Figura 5.21 no se observa tal desviación. De esta observación se concluyó que las diferencias observadas en la Figura 5.20 se deben a diferencias de la respuesta al coseno real con la modelada, las cuales afectan por igual a ambos fotodiodos y desaparecen al normalizar la diferencia entre las I_{CC} , como se planteó en la Ec. 2.16 en la etapa de diseño. El corrimiento del cero de la función de transferencia se atribuye al error de alineación entre la ventana y el detector.

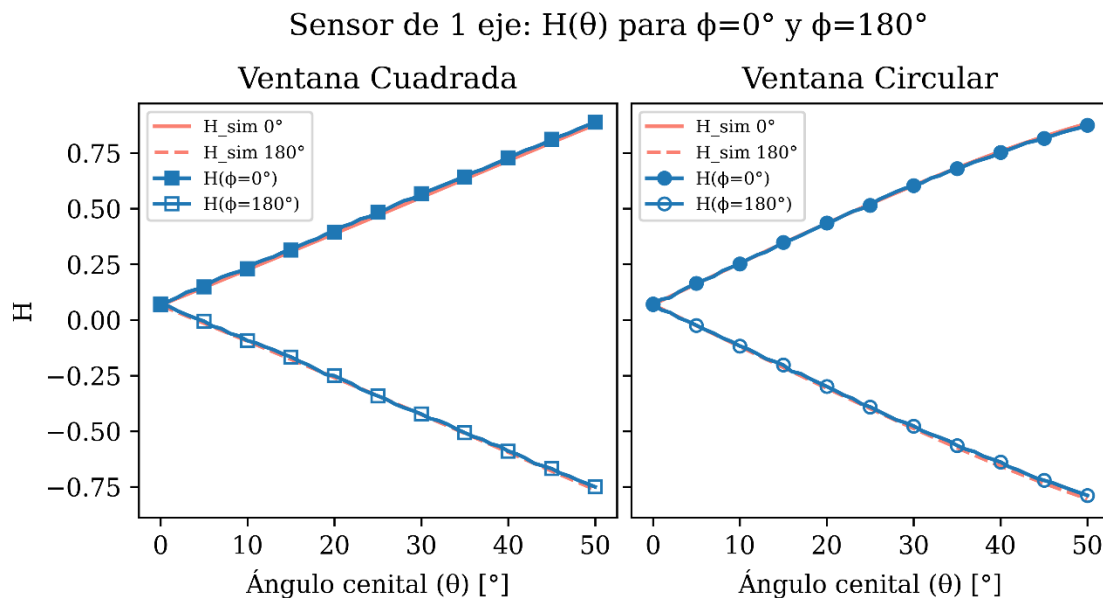


Figura 5.21. Función de transferencia H del sensor de un eje con ventana cuadrada (izquierda) y circular (derecha).

5.4.3. Comparación del sensor de dos ejes con la simulación

En el sensor de dos ejes, a diferencia del sensor de un eje, el área iluminada en cada fotodiodo no se mantiene constante para todo ángulo cenital en ningún ángulo azimutal, por lo que no se puede verificar la respuesta al coseno de cada fotodiodo con la ventana, independientemente de la geometría de esta. Los ángulos azimutales de interés son 0° , 90° , 180° y 270° , posiciones donde el eje de elevación de la base coincide con alguno de los ejes de medición del sensor, siguiendo la representación de la Figura 5.5(b).

La comparación entre las I_{CC} medidas del sensor con ventana cuadrada y la simulada se muestra en la Figura 5.22 para las cuatro posiciones azimutales de interés. En la

Figura 5.23, se presenta la función de transferencia calculada a partir de las mediciones y en líneas discontinuas la simulada.

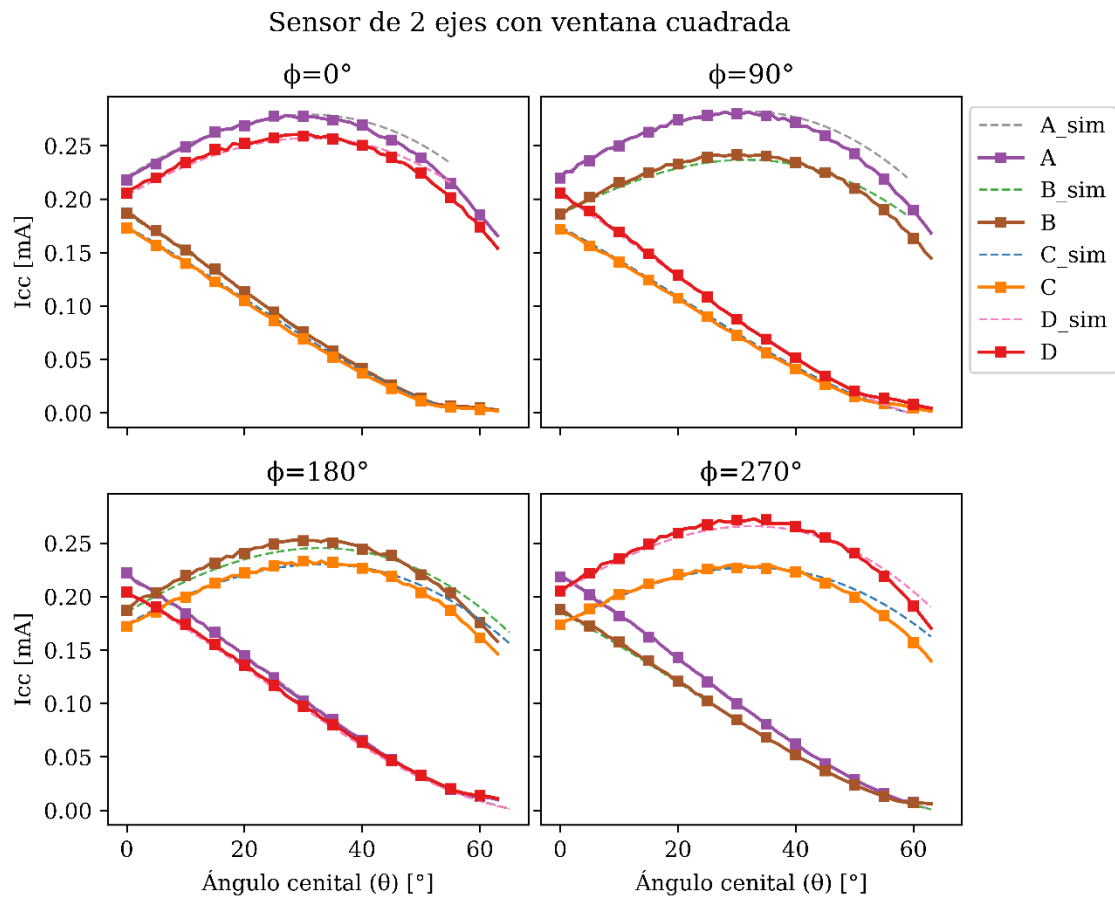


Figura 5.22. Comparación de la respuesta medida del sensor de dos ejes con ventana cuadrada con la respuesta simulada en posiciones azimutales de interés.

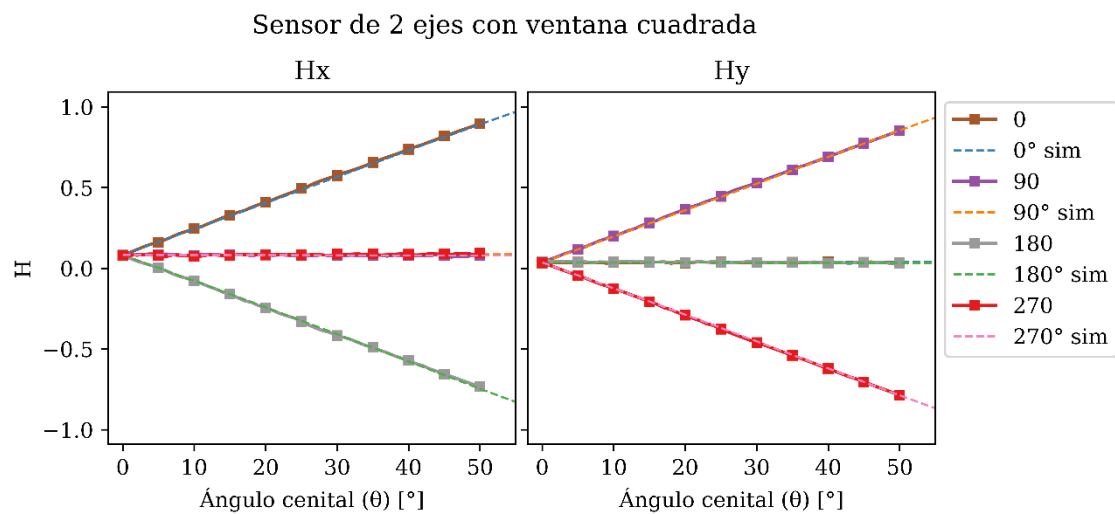


Figura 5.23. Comparación de las funciones de transferencia de cada eje de medición del sensor de dos ejes con detector de cuatro cuadrantes con ventana cuadrada.

Si bien en la Figura 5.22 se observan algunas diferencias entre la medición y la simulación, estas no se trasladan al gráfico de la función de transferencia, como se observa en la Figura 5.23. Además, se resalta la linealidad de la función de transferencia al utilizar la ventana cuadrada, en concordancia con lo planteado en el Capítulo 2 “Diseño y simulación de sensores solares finos”. En la Figura 5.23, se evidencia que el sensor no es sensible a variaciones de la posición en el eje perpendicular al eje de medición. Mediante la caracterización de respuesta angular realizada se pudo constatar la linealidad y sensibilidad de la repuesta en un FOV de 50°.

Un análisis similar se realizó para el sensor de dos ejes con la ventana circular, y se presenta en las Figura 5.24 y Figura 5.25. Si bien los errores de alineación no se pudieron determinar con exactitud, se observa que la función de transferencia tiene el comportamiento esperado.

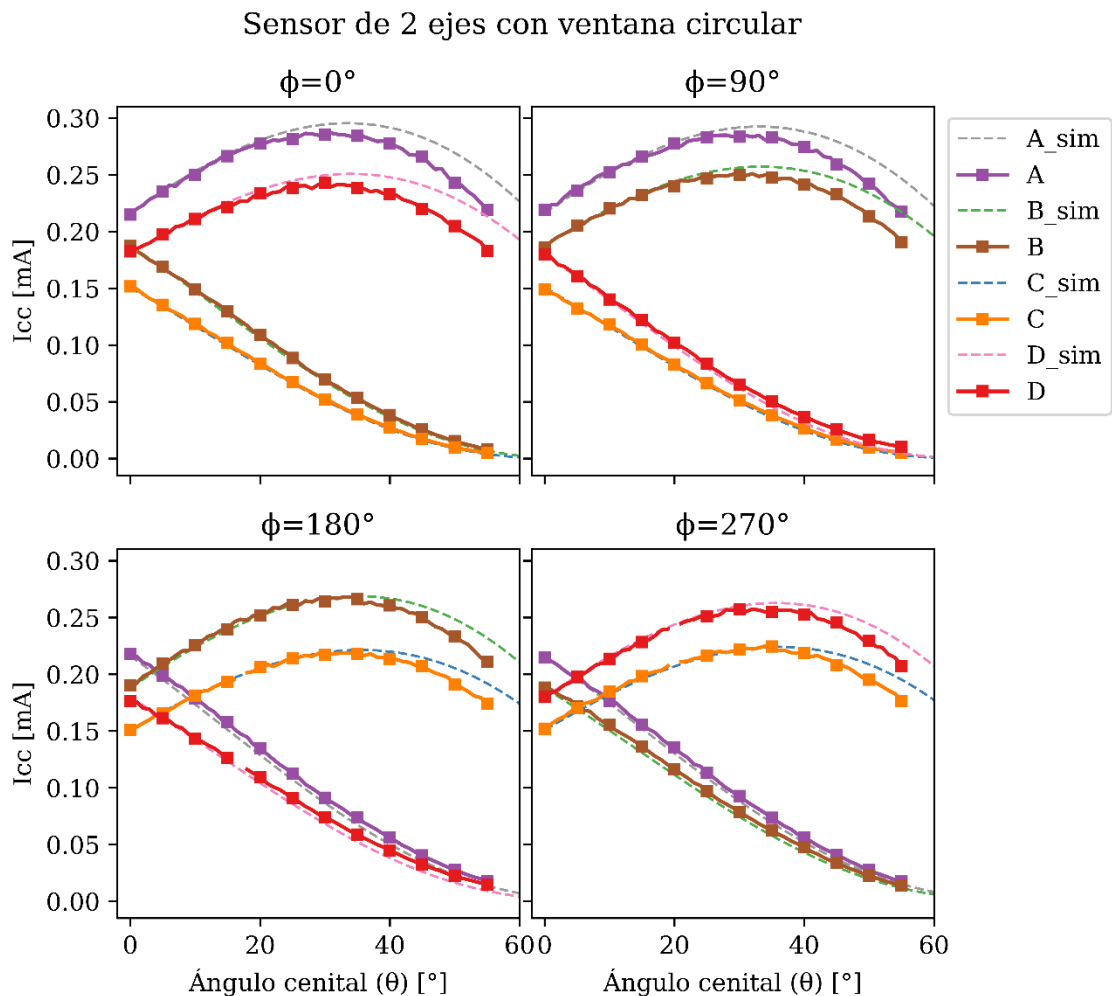


Figura 5.24. Comparación de la respuesta medida del sensor de dos ejes con ventana circular con la respuesta simulada en posiciones azimutales de interés.

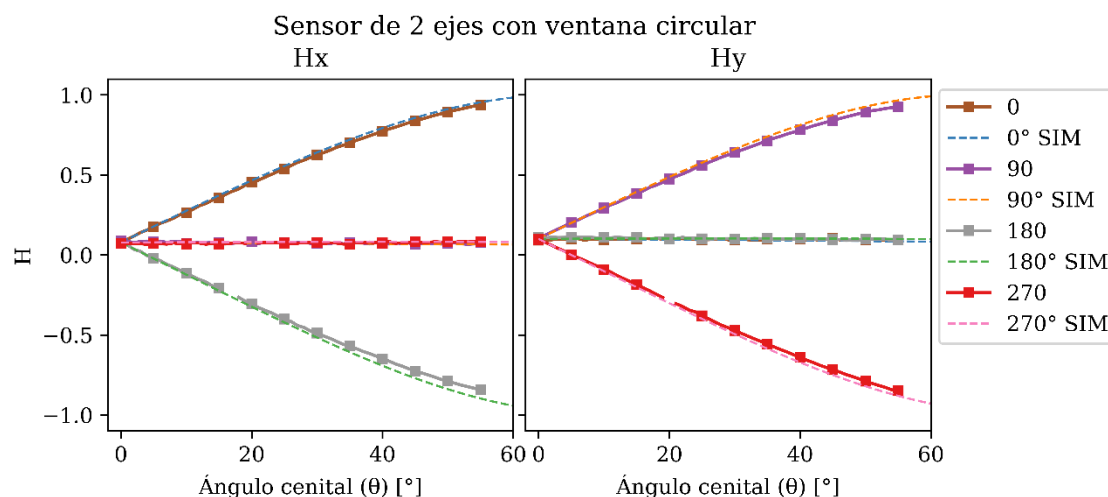


Figura 5.25. Comparación de las funciones de transferencia de cada eje de medición del sensor de dos ejes con detector de cuatro cuadrantes con ventana circular.

5.5. Conclusiones

Los datos obtenidos experimentalmente fueron consistentes con la simulación de la respuesta angular, validando el diseño de los sensores finos. Las funciones de transferencia medidas reflejaron con precisión los modelos teóricos desarrollados. Este resultado es crucial para el desarrollo futuro de los sensores, ya que se pueden planificar alternativas para la mejora de los dispositivos basadas en los resultados de las simulaciones, ahorrando tiempo y recursos.

Se pudo determinar de forma experimental la incidencia normal de la fuente de luz en la base y se definió que el error del ajuste del 0° de elevación de la base es de $0,5^\circ$. Además, se pudo determinar el error de alineación entre la ventana y el detector, lo cual es un factor clave para realizar correcciones y ajustes en la fabricación e integración de los sensores. Este análisis mostró la necesidad de optimizar los procesos de elaboración de la ventana, ya que incluso un pequeño error de alineación puede afectar significativamente la respuesta esperada del sensor.

Con este trabajo se validó el equipo desarrollado como una herramienta efectiva para mejorar las mediciones de respuesta angular que se realizan en el DES. El nuevo equipamiento permitió realizar mediciones cada 1° de elevación y hasta 75° de elevación. Además, con la automatización del movimiento de la base se minimizaron los errores experimentales al medir la respuesta angular de los dispositivos fotovoltaicos, ya que se pudo garantizar la repetibilidad del proceso.

Los prototipos elaborados se midieron entre 0 y 50° de elevación y entre 0 y 360° de rotación. Se concluyó que los sensores elaborados tienen una precisión de 1° en un FOV de 50°. Con esta caracterización se pudo validar el buen funcionamiento de los sensores elaborados en el rango de ángulos analizado.

La planificación futura de esta caracterización incluye añadir funcionalidades al equipo como son medir cada 5° de rotación en lugar de 30°, minimizar el paso de los motores de elevación para medir en intervalos menores a 1°.

Referencias

- [1] A. Moreno, M. Tamasi, M. Martínez Bogado, M. Díaz Salazar y N. Kondratiuk, «Comparación de la respuesta angular de un sensor grueso de posición para uso satelital con un sensor comercial.,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - AVERMA*, vol. 20, 2016.
- [2] M. Díaz Salazar, N. Kondratiuk, A. Moreno, M. Martínez Bogado, M. Tamasi y J. Di Santo, «Caracterización angular automatizada de sensores solares fotovoltaicos,» vol. 22, pp. 07.01-07.09, 2018.

Capítulo 6

Ensayo de ambiente espacial: estudio del daño por radiación

Un satélite en órbitas bajas (LEO) recibe radiación de protones isotrópica con energías entre los keV y cientos de MeV, entre otras partículas [1]. Las principales fuentes de radiación que afectan los dispositivos fotovoltaicos son los electrones y protones atrapados por el campo magnético terrestre (Figura 6.1), además de los protones provenientes del Sol [2].

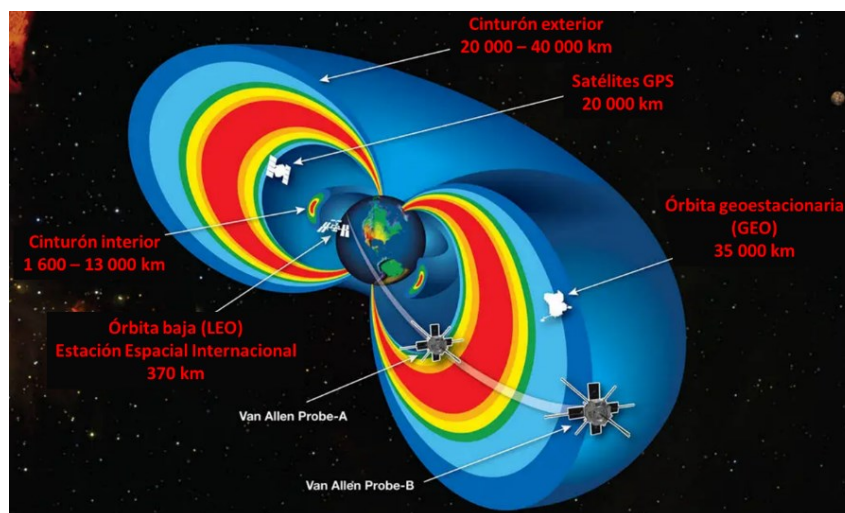


Figura 6.1. Cinturones de radiación de Van Allen de la Tierra.

Con el fin de predecir el comportamiento de los dispositivos en el ambiente espacial, se evalúa la degradación de sus parámetros eléctricos bajo los efectos de la irradiación con protones o electrones en experimentos realizados en la Tierra. [3]

El daño permanente en la juntura $p-n$ de silicio cristalino es causado por colisiones de partículas incidentes con los átomos en la red cristalina, denominados PKA (*Primary Knock-on Atom*, por sus siglas en inglés), los cuales son desplazados de sus posiciones. Dependiendo de la energía recibida, los PKA pueden generar una cascada de desplazamiento. La situación evoluciona disipando la energía inicial para formar una estructura estable de defectos. Estos defectos degradan las propiedades de transporte del material, particularmente el tiempo de vida de los portadores minoritarios. El daño es consecuencia de la producción y/o migración de los defectos generados, que forman conjuntos de dislocaciones de diversos tipos. En el caso del silicio, la estructura del daño depende en gran medida del nivel de dopaje [4].

En cuanto a los sensores finos elaborados, se propusieron dos experimentos. Primero, estudiar la degradación que sufren los parámetros eléctricos de un detector con un fotodiodo de silicio protegido por un vidrio de 1 mm de espesor. Luego, se planteó analizar si el daño es homogéneo en el arreglo de dos fotodiodos. Para esto, se estableció como objetivo someter los dispositivos a una irradiación con protones para caracterizar el daño que se produce en el detector debido a la radiación en el ambiente espacial.

El ensayo en ambiente espacial se divide en tres etapas: diseño del experimento, irradiación y caracterización eléctrica y electrónica (Figura 6.2).

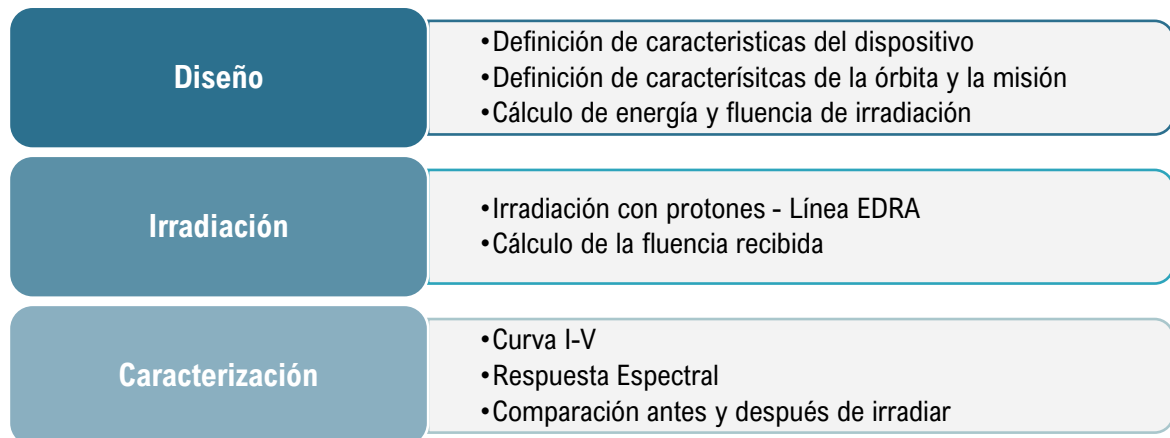


Figura 6.2. Etapas del ensayo de ambiente espacial.

En la primera etapa, se definieron las características del dispositivo bajo estudio, así como las condiciones a las que va a estar expuesto en el espacio, con el fin de obtener, mediante simulación, las condiciones necesarias para llevar a cabo el experimento en el laboratorio. En la segunda etapa, los dispositivos fueron sometidos al ensayo destructivo de irradiación con protones en la línea experimental EDRA (Ensayos de

Daño por RAdiación) del DES. En la última etapa, se realizó la caracterización de los parámetros eléctricos de los dispositivos irradiados, comparando los resultados obtenidos con los previos a la irradiación.

6.1. Diseño de los experimentos

A partir de las características del dispositivo y los datos de la misión, se realiza un análisis de la estructura del sensor en las condiciones de la misión para obtener la fluencia acumulada de protones que recibe el detector de silicio hasta el final de la vida útil (AOL, *After Of Life*). A partir de esta simulación, se diseña el experimento y se seleccionan los métodos para reproducir los daños en el laboratorio.

Como se mencionó en los capítulos previos, los sensores bajo estudio tienen un detector de silicio cristalino (Si-c) de 650 μm de espesor y un vidrio de 1 mm de espesor. Para este experimento se considera que entre el vidrio y el detector hay una capa de 30 μm de pegamento o silicona. Las metalizaciones de la ventana y los contactos son de aproximadamente 1 μm y el espesor de SiO_2 es de 270 nm. La estructura del dispositivo se presenta en la Figura 6.3.

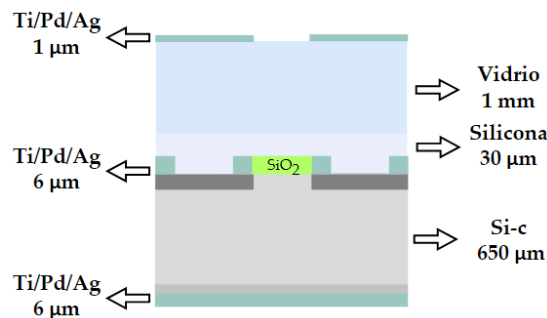


Figura 6.3. Estructura del dispositivo bajo estudio.

Para producir en el laboratorio la misma degradación de los parámetros eléctricos que la que se produciría en órbita durante la vida útil del satélite, se utilizaron dos métodos: el método estándar utilizado en caracterización de celdas solares por el Laboratorio de Propulsión de Aeronaves, (*Jet Propulsion Laboratory, JPL*) [5] y el método CAC, desarrollado por el Dr. Martín Alurralde [6].

Para simular las condiciones de irradiación en el laboratorio con el método JPL, con una energía de 10 MeV, se utilizó el programa SPENVIS [7]. Se simuló una juntura *p-n* de silicio cristalino con un vidrio de 1 mm de espesor para obtener la fluencia integral de protones que recibe el sensor en una misión de 5 años, con un eje apuntando al Sol en una órbita heliosincrónica con una altitud de 600 km. Con el método JPL, se obtuvo una fluencia equivalente de $2,2 \cdot 10^{10}$ p/cm². En este método, el detector se irradia sin vidrio,

con la energía y la fluencia que tienen los protones cuando llegan a la superficie del silicio, después de sobrepasar el vidrio de borosilicato y la silicona del pegamento.

Con el método CAC, se puede reproducir el daño si se logra emular en el laboratorio los espectros de PKA, tanto en energía como en profundidad. La suposición principal de este método es que, para la irradiación de protones, el daño relevante es el daño intracascada. Una consecuencia de este enfoque es que, para simular la irradiación espacial de los dispositivos en el laboratorio, es conveniente realizar la irradiación por el contacto posterior del detector, con una energía que dependerá del grosor del vidrio de la ventana. [6]

Los pasos que se siguieron para obtener la energía y la fluencia con que se deben irradiar los dispositivos en el método CAC son:

1. Obtener la fluencia espacial total que responde a las características de la órbita y la misión propuestas con el programa SPENVIS.
2. Generar el archivo Trim.dat con el programa desarrollado por Dr. Alurralde [6], donde se encuentra la información de los protones con que se irradia la muestra.
3. Simular la irradiación en el programa SRIM, el dispositivo con las especificaciones de la Figura 6.3, para obtener el espectro de PKA en profundidad y en energía de la muestra, Figura 6.4.
4. Comparar con el daño en profundidad y en energía que se obtiene del SRIM al irradiar con un espectro espacial un sensor de silicio con un vidrio de 1 mm.

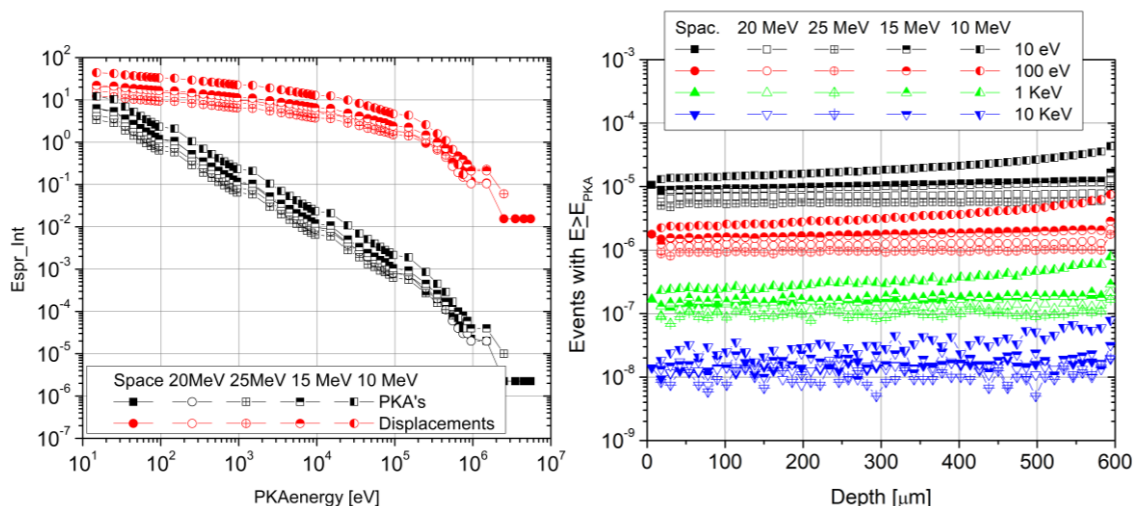


Figura 6.4. Espectro integral de PKA en energía y en profundidad para cuatro energías de umbral (10 eV, 100 eV, 1 keV y 10 keV) para cuatro casos de simulación de irradiación posterior en el laboratorio entre 10 y 20 MeV y una simulación de irradiación frontal espacial del sensor con un vidrio de 1 mm.

Dado que el TANDAR es un acelerador monoenergético, se analiza con que energía del haz se logra un espectro similar en energía y profundidad al que se produce por irradiar con los protones descritos en el archivo de entrada. Para encontrar las condiciones de irradiación en el laboratorio, en las que $K(E_{ref})$ podría considerarse constante, se realizaron diferentes simulaciones de irradiaciones de laboratorio. De esta forma, se obtiene el parámetro K y para escalar la fluencia espacial y obtener la fluencia con la que se debe irradiar la muestra en el laboratorio se emplean las Ec. 6.1 y 5.2.

$$\Phi_{iLab} = \Phi_{iSpace}K(E_{ref}) \quad (6.1)$$

$$K(E|ref) = \frac{n_i(E_{ref})|_{space}}{n_i(E_{ref})|_{Lab}} \quad (6.2)$$

En la Figura 6.5, se muestran los resultados de la simulación del método CAC para diferentes energías, 10 MeV, 15 MeV, 20 MeV y 25 MeV, hasta obtener un $K(E_{PKA})$ constante en toda la profundidad de la muestra.

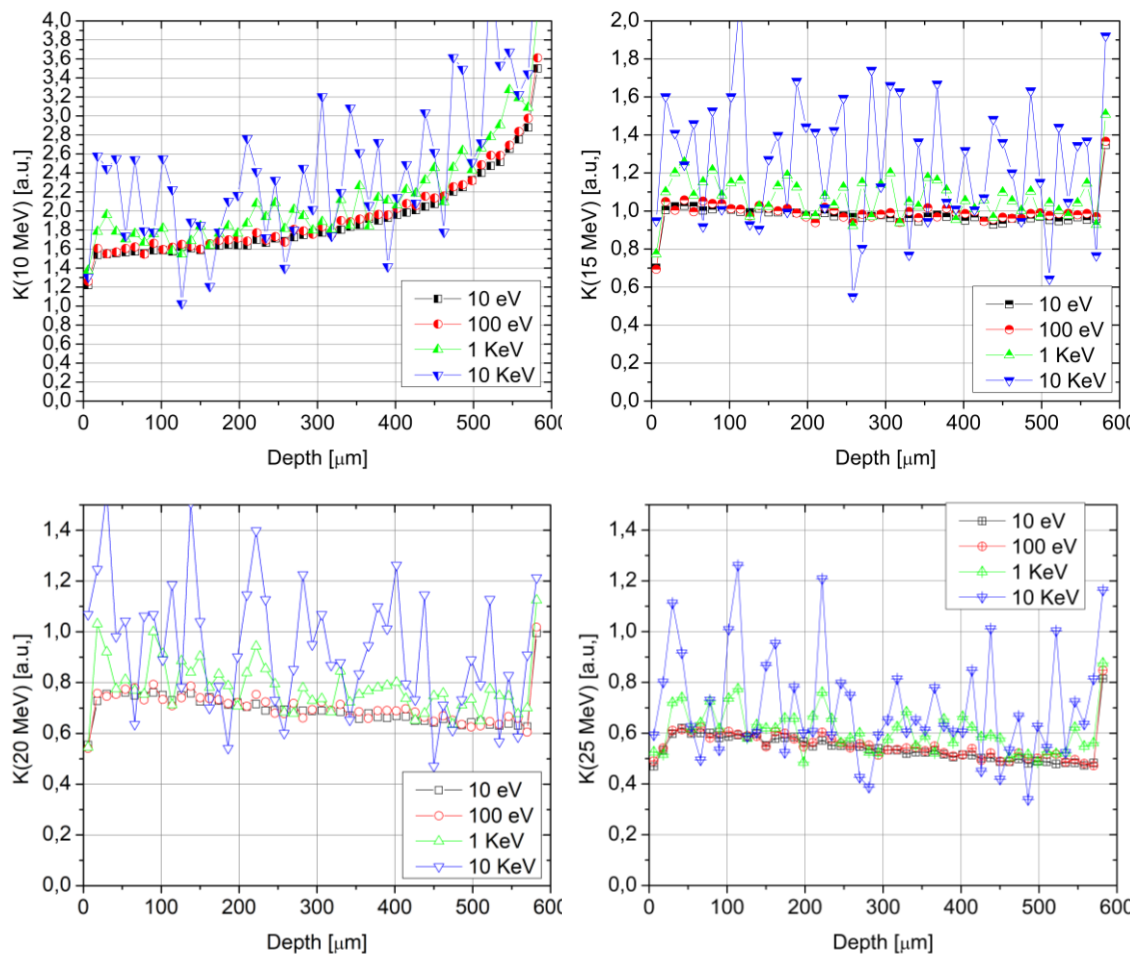


Figura 6.5. Simulaciones para obtener la energía y el K .

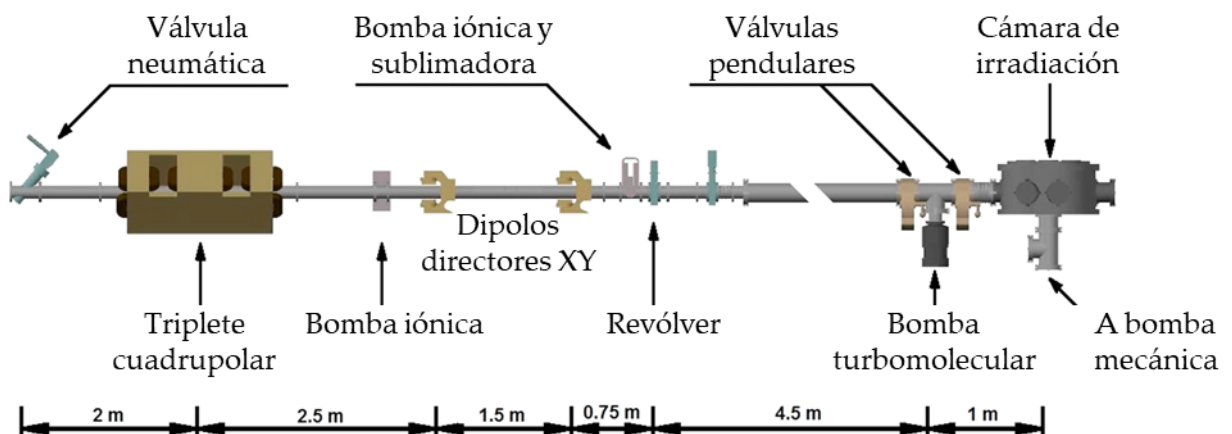
Se observa que la relación entre el espectro de PKA en el espacio y en el laboratorio, con una energía de 15 MeV, se mantiene prácticamente constante e igual a 1 para las colisiones con una energía transferida de al menos 10 y 100 eV, en toda la profundidad de la muestra de silicio. Los valores deseados de fluencia y energía obtenidos mediante la simulación para el método CAC son, una fluencia de $7 \cdot 10^{10}$ p/cm² y una energía de 15 MeV.

6.2. Irradiación de los dispositivos

Para realizar el ensayo de ambiente espacial se utilizó la línea EDRA del DES, Figura 6.6(a), la cual se encuentra instalada en el acelerador de iones pesados de 20 MV tipo Tandem Van de Graaff (TANDAR) de la CNEA. En la línea EDRA, que está diseñada para estudiar el comportamiento del dispositivo en condiciones simuladas de ambiente espacial [8], es posible realizar una irradiación de protones para estudiar la dosis total ionizante y no ionizante correspondiente.



(a)



(b)

Figura 6.6. a) Línea EDRA instalada en el acelerador TANDAR, b) diagrama de la línea EDRA.

Para caracterizar el haz de irradiación, la cámara posee una serie de copas de Faraday (CF) distribuidas de forma equidistante que permiten medir la fluencia de dicho haz y su distribución espacial.

Para irradiar los dispositivos se planificaron los siguientes pasos [8]:

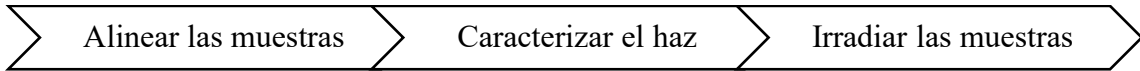


Figura 6.7. Pasos de la irradiación de los sensores.

El primer paso fue colocar los sensores en los portamuestras, se pegaron con cinta de Kapton bifaz en un soporte de aluminio, Figura 6.8(a). Para irradiar con el método JPL, los sensores se colocaron con el área activa enfrentada al haz y para el método CAC se colocaron con el contacto posterior enfrentado al haz.

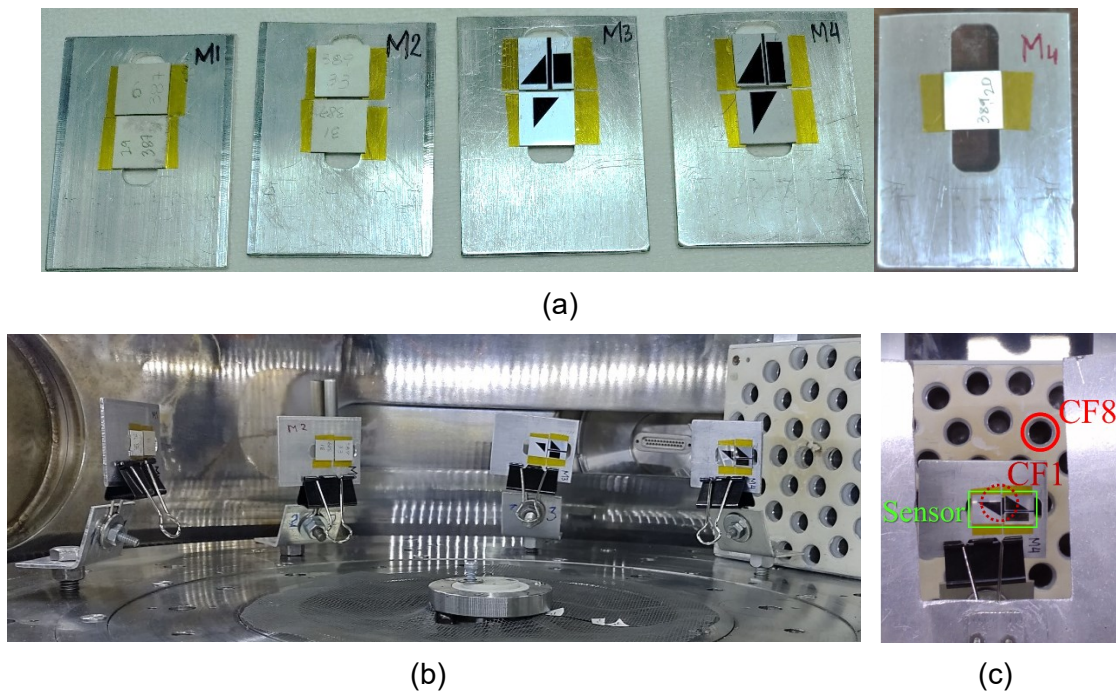


Figura 6.8. a) Portamuestras con los sensores en la cámara de irradiación, b) alineación de los sensores con CF1 y ventana en el escudo de aluminio.

Los portamuestras se fijaron en un disco móvil, Figura 6.8(b), y se procedió a alinear las muestras con la CF1, dejando expuesta la CF8, como se muestra en la Figura 6.8(c). El próximo paso fue la caracterización del haz. En este paso los portamuestras se colocaron detrás de un “escudo” y el haz se enfocó utilizando un triplete cuadrupolar, Figura 6.6(b). Los dipolos directores XY, Figura 6.6(b), se utilizan para posicionar con precisión el punto del haz. Luego, con una rueda de degradación de energía (revólver) que contiene una lámina de Al de 10 μm para difundir las partículas se obtiene un flujo

homogéneo en toda el área de irradiación. La corriente del haz de protones se midió mediante la matriz de copas de Faraday de 3x3 y la homogeneidad del haz se determinó analizando la corriente medida en cada CF. Para determinar el tiempo necesario para llegar a la fluencia calculada en la simulación, se midió la fluencia en la CF1 durante 100 s. De igual forma se midió la CF8, durante 100 s, y se determinó la tasa CF1/CF8. Luego de esta caracterización, el haz de protones es interrumpido, se cierra la copa de Faraday FC-03 del acelerador y las muestras son posicionadas en el área de irradiación. Luego, se deja pasar el haz hasta acumular la fluencia deseada. Durante la irradiación de las muestras se midió la CF8, la fluencia recibida en la CF1 se obtiene a partir de la medición de la CF8 y la tasa CF1/CF8.

Los sensores irradiados, sus características y el experimento del que formaron parte se detallan en la Tabla 6.1, en total se realizaron cinco experimentos. En los cuatro experimentos del 2023 se colocó un sensor con un fotodiodo y otro con dos fotodiodos.

Tabla 6.1. Sensores colocados en cada experimento y sus características.

Experimento	Sensor	Tipo de detector	Área activa
M4_2022 CAC	389-20	Arreglo de dos fotodiodos: dos cuadrantes	389-20 A y B: 19,7 mm ²
M1_2023 CAC	387-06	Arreglo de dos fotodiodos: Triangular y rectangular	387-06T: 28,17 mm ² 387-06R: 38 mm ²
	387-29	Fotodiodo triangular	28,5 mm ²
M2_2023 CAC	389-33	Arreglo de dos fotodiodos: Triangular y rectangular	389-33T: 28,17 mm ² 389-33R: 33,25 mm ²
	387-31	Fotodiodo triangular	21 mm ²
M3_2023 JPL	387-18	Arreglo de dos fotodiodos: Triangular y rectangular	387-18T: 20,16 mm ² 387-18R: 28 mm ²
	387-32	Fotodiodo triangular	21 mm ²
M4_2023 JPL	389-32	Arreglo de dos fotodiodos: Triangular y rectangular	389-32T: 28,17 mm ² 389-32R: 33.25 mm ²
	387-30	Fotodiodo triangular	28,5 mm ²

Luego de irradiar las muestras, se calculó la fluencia que recibió cada muestra durante el ensayo a partir de los valores medidos de las CF durante la irradiación. En la Figura 6.9 se muestra la medición de la carga en CF8 durante la irradiación de la muestra M4_2022. En la Tabla 6.2, se presenta la fluencia calculada que recibió cada portamuestras, así como el tiempo que duró el ensayo y el cociente entre las copas CF1 y CF8.

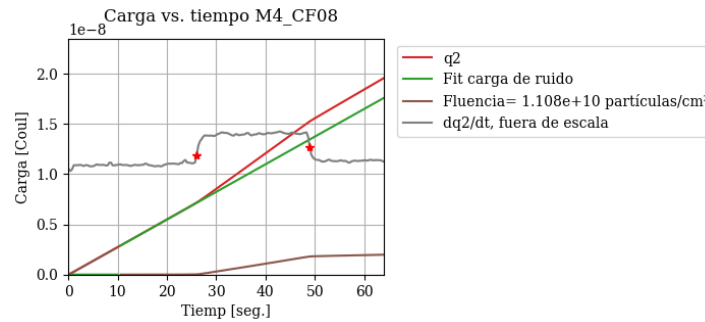


Figura 6.9. Determinar la fluencia recibida en la CF8.

Tabla 6.2. Fluencia calculada a partir de la medición de las CF en cada experimento.

Método	Energía [MeV]	Fluencia simulada [p/cm^2]	Experimento	Tiempo [s]	CF1/CF8	Fluencia medida [p/cm^2]
CAC	15	$7 \cdot 10^{10}$	M4_2022	43	1,16	$9,07 \cdot 10^{10}$
			M1_2023	130	2,83	$12,7 \cdot 10^{10}$
			M2_2023	155	2,83	$15,8 \cdot 10^{10}$
JPL	10	$2,2 \cdot 10^{10}$	M3_2023	23	2,19	$2,422 \cdot 10^{10}$
			M4_2023	23	2,19	$2,429 \cdot 10^{10}$

Se observa que en el método CAC la fluencia recibida es hasta un 125% mayor de lo simulado. Esto se pudo deber a problemas de estabilidad en el haz durante la irradiación. Si bien la fluencia con que se irradiaron esas muestras es mucho mayor a la simulada, los resultados se muestran en este trabajo como ejemplo de un caso de sobreirradiación, que también contribuye al análisis de la resistencia de los sensores al ambiente espacial.

6.3. Caracterización de la degradación de los dispositivos irradiados

Los sensores irradiados se caracterizaron eléctricamente mediante curvas I-V y respuesta espectral. Las mediciones realizadas se compararon con los resultados previos a la irradiación para determinar la degradación que sufrieron los dispositivos. El análisis se dividió en dos etapas, primero se caracterizó la degradación de los detectores que tiene un solo fotodiodo y luego caracterizó la degradación en el arreglo de fotodiodos. Los resultados obtenidos en los detectores de un fotodiodo sirvieron como referencia para analizar el comportamiento del arreglo de fotodiodos, ya que esta es la primera experiencia de irradiación de un arreglo de fotodiodos que se realiza en el grupo de trabajo.

6.3.1. Caracterización mediante curvas I-V

La medición de la curva característica I-V se llevó a cabo en condiciones estándar AM0 en el laboratorio de caracterización del DES, con el procedimiento y el equipamiento que se detalló en el Capítulo 4. Las curvas características de los sensores antes de irradiar ya fueron analizadas en el Capítulo 4, por lo que resulta de interés para este ensayo es comparar estas mediciones con las del sensor irradiado.

En la Figura 6.10, se presentan los resultados de las mediciones de las curvas I-V de los detectores con un solo fotodiodo triangular antes y después de irradiar. Las curvas presentadas están normalizadas con el valor de la I_{CC} antes de la irradiación, de forma tal que se pueda comparar la degradación entre experimentos. En la irradiación con fluencia de $9,07 \cdot 10^{10}$ p/cm², no se colocó ningún detector de un solo fotodiodo, por esa razón no aparece ese experimento en la comparación.

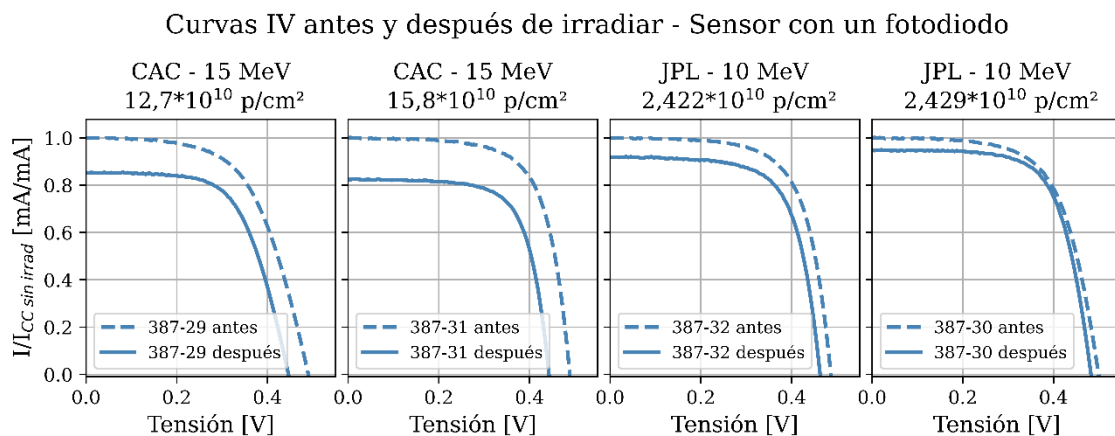


Figura 6.10. Caracterización de la degradación de la respuesta eléctrica de sensores con un solo fotodiodo mediante curvas I-V.

A partir de los resultados obtenidos se concluyó que con el método CAC, los detectores exhiben una mayor degradación tanto en I_{CC} como en V_{CA} con respecto al método JPL. Esto se puede adjudicar a que en los experimentos con el método CAC la fluencia que recibieron los detectores es mayor a la simulada, como se discutió previamente.

La degradación de los fotodiodos se calculó como el porcentaje en que disminuyó la J_{CC} al ser irradiado. En la Tabla 6.3 se muestran los valores de la J_{CC} antes y después de irradiar, así como la degradación calculada de cada sensor.

Tabla 6.3. Degradación calculada a partir de la caracterización de la curva I-V.

Sensor	Método	Energía [MeV]	Fluencia [p/cm^2]	J_{CC} antes [mA/mm^2]	J_{CC} después [mA/mm^2]	Degradación [%]
387-32	JPL	10	$2,42 \cdot 10^{10}$	35	32,2	8,2
387-30	JPL	10	$2,43 \cdot 10^{10}$	35,6	33,8	5,2
387-29	CAC	15	$12,7 \cdot 10^{10}$	34,9	29,7	14,8
387-31	CAC	15	$15,8 \cdot 10^{10}$	35	28,9	17,5

En la Figura 6.11 se presentan los resultados de la caracterización los detectores compuestos por dos fotodiodos. La primera observación de las mediciones es que, la degradación varía entre los fotodiodos de un mismo detector, lo cual se puede deber al comportamiento rectificante que se observa en uno de ellos.

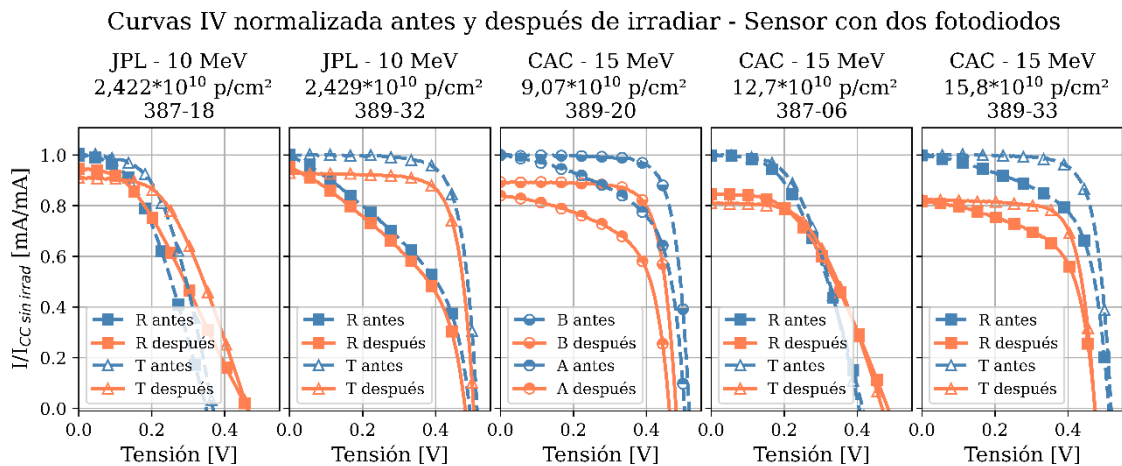


Figura 6.11. Curvas I-V normalizadas antes y después de irradiar normalizadas con la I_{CC} antes de irradiar de los sensores con dos fotodiodos.

La degradación calculada a partir de la variación de la I_{CC} de cada fotodiodo antes y después de irradiar se muestra en la Tabla 6.4. Se observa que la degradación es diferente en cada fotodiodo del sensor, pero que están en el mismo orden de magnitud. Por otro lado, los resultados obtenidos para los sensores con dos fotodiodos se corresponden con los obtenidos en los sensores con un solo fotodiodo en su correspondiente experimento. Se observa que, a mayor fluencia en el método CAC, hay una mayor degradación de la I_{CC} . En el método CAC, la degradación calculada está entre el 10 y el 20%, mientras que con el método JPL, la degradación se encuentra entre 4 y 9%. La diferencia se puede deber a la sobreirradiación en los experimentos en el método CAC, y a las diferencias en la naturaleza de los métodos. La diferencia en los métodos se debe a que en el método CAC se daña un poco más la zona cercana a la

juntura que en el JPL, donde la mayoría del daño va a estar cerca del contacto posterior del dispositivo [9].

Tabla 6.4. Degradación de la I_{CC} de los sensores con dos fotodiodos.

Método	Energía	Fluencia [p/cm ²]	Sensor	I_{CC} antes [mA]	I_{CC} después [mA]	Degradación de I_{CC} [%]	
CAC	15 MeV	$15,8 \cdot 10^{10}$	389-33	R	11,4	9,4	18,1
				T	10,2	8,4	17,6%
		$12,7 \cdot 10^{10}$	387-06	R	13,5	11,4	15,4%
				T	10,2	8,2	19%
		$9,07 \cdot 10^{10}$	389-20	A	7,9	6,7	15,7%
				B	7,9	7,1	10,5%
JPL	10 MeV	$2,42 \cdot 10^{10}$	387-18	R	9,9	9,4	5,1%
				T	7,5	6,9	9%
		$2,43 \cdot 10^{10}$	389-32	R	11,2	10,7	4,8%
				T	10,2	9,5	7,1%

6.3.2. Caracterización de la respuesta espectral

La caracterización de los dispositivos se complementó con la caracterización de la degradación de la Respuesta Espectral (RE) de los dispositivos ensayados. La RE se midió con el equipamiento y el procedimiento que se mencionó en el Capítulo 4. En la Figura 6.12, se muestra la RE de los detectores con un solo fotodiodo, antes y después de irradiar.

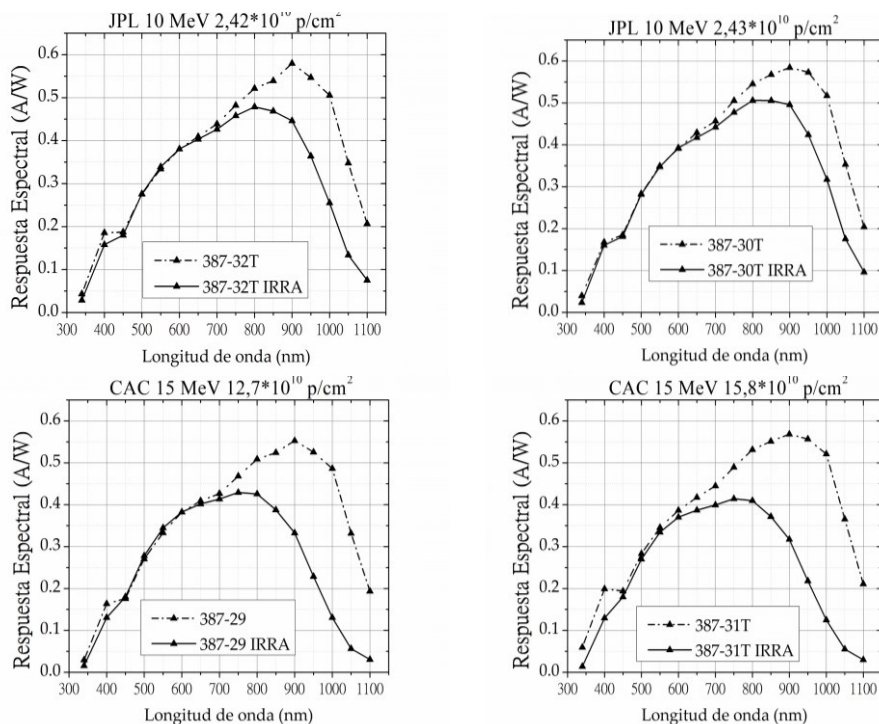


Figura 6.12. Respuesta espectral sensores con un solo fotodiodo.

Con esta caracterización se observó que con el método JPL se aprecia una degradación de la RE del dispositivo a partir de 750 nm de longitud de onda. Por otro lado, al irradiar con el método CAC, donde los sensores recibieron una fluencia mayor a la simulada, se observa que la degradación comienza desde aproximadamente 650 nm. Para calcular la degradación a partir de la RE del dispositivo, se calculó la I_{CC} al integrar la RE por el espectro AM0, Ec. 1.33. En la Tabla 6.5, se puede comparar la I_{CC} calculada antes y después de irradiar, y la degradación calculada.

Tabla 6.5. Degradación de la I_{CC} , medida a partir de la RE.

Sensor	Método	Energía	Fluencia	I_{CC} antes	I_{CC} después	Degradación
387-29	CAC	15 MeV	$12,7 \cdot 10^{10}$ p/cm ²	9,9 mA	8,1 mA	18,3%
387-31	CAC	15 MeV	$15,8 \cdot 10^{10}$ p/cm ²	7,7 mA	5,7 mA	25%
387-32	JPL	10 MeV	$2,42 \cdot 10^{10}$ p/cm ²	7,5 mA	6,6 mA	12%
387-30	JPL	10 MeV	$2,43 \cdot 10^{10}$ p/cm ²	10,5 mA	9,4 mA	9,8%

Los resultados obtenidos siguen la misma tendencia que en la caracterización de la curva I-V, aunque la degradación calculada a partir de la RE es mayor que la calculada mediante la curva I-V.

En la segunda etapa de caracterización, se comparó la RE de los dispositivos con dos fotodiodos, antes y después de irradiar. En la Figura 6.13, se presenta la RE de los sensores irradiados con el método CAC y mientras que en la Figura 6.14 se muestran los sensores irradiados con el método JPL. Como punto de comparación, en cada gráfico se añadieron las respuestas de los dispositivos con un solo fotodiodo irradiados en las mismas condiciones.

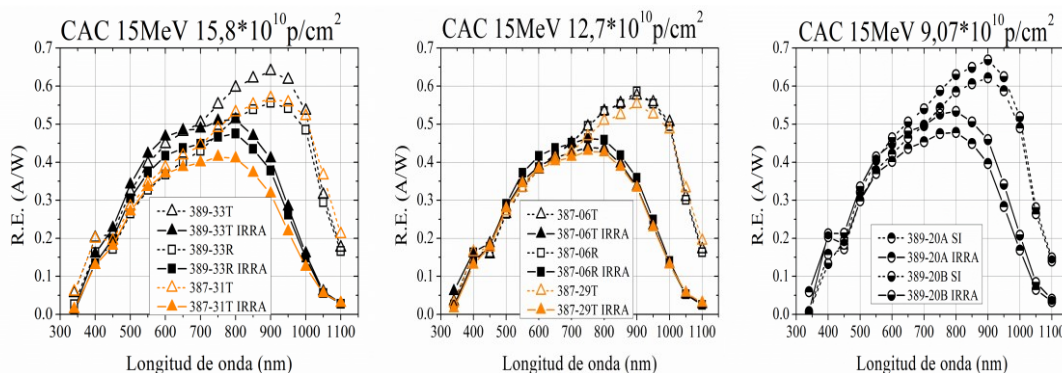


Figura 6.13. Respuesta espectral sensores irradiados con el método CAC.

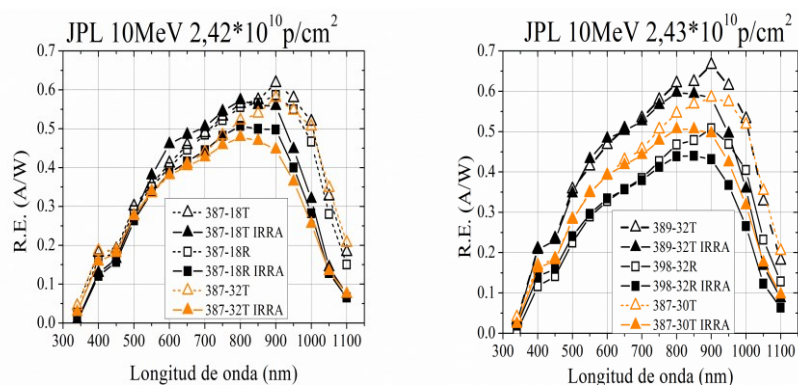


Figura 6.14. Respuesta espectral de sensores irradiados con el método JPL.

En las mediciones previas a la irradiación se observa que, a excepción del 387-06, la RE varía entre los fotodiodos del mismo sensor (curvas en color negro). Este comportamiento se puede atribuir a las diferencias observadas en la curva I-V de estos dispositivos, que se discutió previamente en el Capítulo 4. En este sentido, el 387-06 es el caso más representativo para comparar los resultados obtenidos entre los detectores con uno y dos fotodiodos, así como entre los resultados de RE y curva I-V. Se concluyó que, en todos los casos, la respuesta espectral se modificó de forma similar en ambos fotodiodos y que, la degradación comienza en puntos similares en los detectores de cada experimento. La I_{CC} de cada fotodiodo, calculada a partir de su RE, se muestra en la Tabla 6.6, así como la degradación calculada con respecto a la I_{CC} antes de irradiar.

Tabla 6.6. I_{CC} y degradación calculada a partir de la RE de los sensores con dos fotodiodos.

Método	Energía	Fluencia [p/cm^2]	Sensor		I_{CC} antes [mA]	I_{CC} después [mA]	Degradación de I_{CC}^{RE} [%]
CAC	15 MeV	$15,8 \cdot 10^{10}$	389-33	R	11,4	9,6	15,3
				T	11,4	10,3	10,0
		$12,7 \cdot 10^{10}$	387-06	R	9,9	8,2	17,1
				T	13,4	11,5	14,3
JPL	10 MeV	$2,42 \cdot 10^{10}$	387-18	R	7,7	7,2	5,9
				T	10,3	8,9	13,3 %
JPL	10 MeV	$2,43 \cdot 10^{10}$	389-32	R	11,9	11,2	6,0
				T	9,9	9,4	5,3

La respuesta espectral de los dispositivos irradiados con fluencias más altas muestra una mayor degradación en longitudes de onda por encima de 650 nm; la contribución a la corriente de cortocircuito para longitudes de onda mayor a 800 nm se reduce drásticamente. Los fotones de longitud de onda larga recorren distancias más largas

antes de ser absorbidos, por lo que están más influenciados por el deterioro de la longitud de difusión de la base.

En la Tabla 6.7 se muestra la comparación de los resultados obtenidos con ambos métodos, para todos los sensores irradiados. Se resalta el 387-06 como punto de comparación entre los dos métodos de caracterización.

Tabla 6.7. Comparación de resultados obtenidos en RE y en curva I-V.

Sensor	RE			IV		
	I_{cc} antes	I_{cc} después	% Daño	I_{cc} antes	I_{cc} después	% Daño
389-33T	11,38 mA	9,64 mA	15,3 %	10,21 mA	8,42 mA	17,6%
389-33R	11,42 mA	10,28 mA	10 %	11,43 mA	9,36 mA	18,1%
387-31	7,66 mA	5,74 mA	25%	7,4 mA	6,1 mA	17,5%
387-06T	9,92 mA	8,23 mA	17,1 %	10,17 mA	8,24 mA	19%
387-06R	13,42 mA	11,51 mA	14,26 %	13,45 mA	11,38 mA	15,4%
387-29	9,86 mA	8,05 mA	18,3%	9,9 mA	8,5 mA	14,8%
389-20A	7,48 mA	6,25 mA	16,5 %	7,92 mA	6,68 mA	15,7%
389-20B	8,03 mA	6,96 mA	13,3 %	7,89 mA	7,06 mA	10,5%
387-18T	7,67 mA	7,22 mA	5,9 %	7,55 mA	6,87 mA	8,98%
387-18R	10,25 mA	8,89 mA	13,3 %	9,89 mA	9,38 mA	5,1%
387-32	7,48 mA	6,57 mA	12,3 %	7,4 mA	6,74 mA	8,2%
389-32T	11,89 mA	11,18 mA	5,97 %	10,23 mA	9,50 mA	7,13%
389-32R	9,95 mA	9,43 mA	5,27 %	11,19 mA	10,66 mA	4,75%
387-30	10,45 mA	9,43 mA	9,8 %	10,1 mA	9,64 mA	5,2%

6.4. Conclusiones

Se simularon en el laboratorio las condiciones que experimenta en el espacio un sensor de silicio cristalino de 650 μm de espesor con una ventana de vidrio de 1 mm, en una misión de 5 años en una órbita LEO. Las muestras fueron irradiadas con los métodos JPL y CAC. En el método JPL, las muestras se irradiaron desde la cara frontal con una energía del haz de 10 MeV y una fluencia de $2,4 \cdot 10^{10}$ p/cm². En el método CAC, las muestras se irradiaron desde el contacto posterior, con una energía de 15 MeV y una fluencia medida entre $9 \cdot 10^{10}$ p/cm² y $1,58 \cdot 10^{11}$ p/cm², con esta fluencia se analizó la respuesta de los sensores ante una sobreirradiación.

A partir de la caracterización de los sensores irradiados se concluyó que, la degradación de los parámetros eléctricos, en particular de la I_{cc} , se encuentra entre un 5 y 10% en los experimentos realizados con el método JPL, mientras que en los experimentos con el método CAC, la sobreirradiación provocó una degradación en la I_{cc} entre 15 y 20%. Este hecho es consistente con una fuerte degradación de la longitud de difusión en la

base, asociada con el daño estructural producido en el volumen del dispositivo, como se concluyó de la medición de RE. La degradación observada en los dispositivos con uno y dos fotodiodos fue similar, en el mismo orden, así como entre técnicas de caracterización. Estos ensayos constituyen un primer paso para caracterizar estos dispositivos para su uso en el ambiente espacial, pero para realizar una estadística más precisa de la degradación que sufren los arreglos de fotodiodos en el espacio, es necesario realizar más experimentos de irradiación.

Referencias

- [1] J. Barth, C. Dyer y E. Stassinopoulos, «Space, atmospheric, and terrestrial radiation environments,» *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 50, nº 3, pp. 466-482, 2003.
- [2] M. Paluszek, «Chapter 7 - Environment,» de *ADCS - Spacecraft Attitude Determination and Control*, Elsevier, 2023, pp. 103-115.
- [3] C. G. Bolzi, M. G. Martínez Bogado y M. J. L. Tamasi, «Reseña del desarrollo de sensores solares en CNEA para misiones satelitales,» *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 31, p. 29–36, 2013.
- [4] M. Alurralde, M. Tamasi, C. Bruno, M. M. Bogado, J. Plá, J. Fernández Vázquez, J. Durán, J. Schuff, A. Burlon, P. Stoliar y A. Kreiner, «Experimental and theoretical radiation damage studies on crystalline silicon solar cells,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 82, nº 4, pp. 531-542, 2004.
- [5] H. Tada, J. Carter Jr, B. Anspaugh y R. Downing, «Solar cell radiation handbook,» 1982.
- [6] M. Alurralde, «Method using the primary knock-on atom spectrum to characterize electrical degradation of monocrystalline silicon solar cells by space protons,» *Journal of Applied Physics*, vol. 95, nº 7, pp. 3391 - 3396, 2004.
- [7] ESA, «Spenvis: The Space Environment Information System (4.6.11),» 2022.
- [8] M. Ibarra, J. Garcia, A. Dato, E. Yaccuzzi, I. Prario, A. Filevich, M. Barrera y M. Alurralde, «E.D.R.A., the Argentine facility to simulate radiation damage in space,» *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 154, pp. 79-84, 2019.
- [9] A. Moreno, M. Díaz Salazar, N. Kondratiuk, M. L. Ibarra, M. Tamasi, M. Alurralde y M. Martínez Bogado, «Could Silicon Solar Sensors Survive a Carrington-Type Event?,» *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 69, nº 6, pp. 1236-1241, 2022.

Conclusiones generales

Los sensores solares de posición tienen aplicaciones tanto en el ámbito terrestre como en el espacial, haciendo de estos instrumentos una herramienta versátil y con demanda de diferentes sectores. El desarrollo de esta tesis se basó en el diseño, elaboración y caracterización de sensores solares finos de posición. Los sensores desarrollados contribuirán al Plan Espacial Nacional y son un complemento a los CSS desarrollados en el DES, ofreciendo una mejora de la precisión en la determinación de la posición del Sol.

Luego de un análisis del estado de la técnica en el mundo y de la tecnología disponible en CNEA, se optó por realizar sensores solares finos de posición basados en un arreglo de fotodiodos integrados en silicio cristalino. Si bien la tecnología de fabricación de dispositivos fotovoltaicos es una tecnología bien conocida, la importancia del trabajo presentado radica en fortalecer y completar la tecnología adquirida en nuestros laboratorios para poder adaptarla a los distintos requerimientos de los adoptantes de estos instrumentos.

El proceso de diseño de los sensores y su validación mediante simulación fue descrito en el Capítulo 2. Los resultados mostraron la importancia de la planificación en el diseño, ya que la sensibilidad y el campo de visión del sensor dependen de la configuración y las dimensiones. Se plantearon como punto de partida distintas geometrías de los fotodiodos y de la ventana. Se analizó mediante simulaciones la respuesta de las distintas configuraciones propuestas. De este análisis, en iguales condiciones de operación, se pudo concluir que el sensor con detector de dos cuadrantes ofrece una mejor sensibilidad que el de fotodiodo triangular y que la combinación del detector de dos cuadrantes con una ventana circular presenta una mejor sensibilidad en un FOV de 45° que con una ventana cuadrada. Asimismo, se analizó la ventaja y desventaja de cada configuración concluyendo que los modelos propuestos sirven como herramientas de evaluación de la respuesta de los sensores fabricados porque han demostrado ser

útiles para la detección y determinación de errores de alineación durante la caracterización de los prototipos elaborados.

En base al análisis realizado en las simulaciones se continuó con el proceso de elaboración de los sensores, descrito en el Capítulo 3. Algunas de las etapas de fabricación son críticas para la obtención del arreglo de fotodiodos como son la máscara de SiO₂ y la difusión de dopantes. Durante la elaboración de los dispositivos se buscaron variantes para poder obtener buenos resultados de la máscara y lograr un mejor aprovechamiento de los substratos. Asimismo, se encontraron algunos problemas propios del trabajo experimental como fue el sobre ataque del SiO₂, lo cual trajo consigo barreras muy angostas que no fueron efectivas para la difusión localizada.

En cuanto al proceso de elaboración de elaboración de la ventana, se modificó el proceso estándar de fabricación añadiendo un paso de pre-corte del vidrio, lo cual permitió una mejor terminación de este componente. Por otro lado, se propone utilizar en el trabajo futuro otros metales como son cromo o níquel para mejorar la adherencia entre el metal y el vidrio, así como alguna pintura o recubrimiento que mitigue el efecto del oxígeno atómico. Además, se evidenció la necesidad de realizar una buena alineación de la máscara de fotolitografía para minimizar el error de alineación al ensamblar el sensor.

Las caracterizaciones que se le realizaron a los dispositivos fueron la medición de la curva característica de corriente tensión, la medición de la respuesta espectral y la medición de la respuesta angular. En el marco de esta tesis se desarrolló un equipo automatizado para la medición de respuesta angular, que permitió realizar mediciones cada 1° de elevación y hasta 75° de elevación. Con este equipamiento se determinó que los sensores elaborados tienen una precisión de 1° en un FOV de 50°. La planificación futura de esta caracterización incluye añadir funcionalidades al equipo como son medir cada 5° de rotación en lugar de 30°, minimizar el paso de los motores de elevación para medir en intervalos menores a 1°. El análisis de las mediciones se realizó en los capítulos 4 y 5. La respuesta angular fue consistente con las simulaciones, validando el diseño de los sensores. La función de transferencia de los sensores con ventana cuadrada mostró una respuesta más lineal que con la ventana circular, mientras que con la ventana circular se aprovechó la simetría de revolución de ésta para evitar errores de alineación entre vidrio y ventana. La función de transferencia de ambos diseños se ajustó bien al modelo, lo cual es crucial para el desarrollo futuro de los sensores, ya que se pueden planificar alternativas para la mejora de los dispositivos basadas en los resultados de las simulaciones, ahorrando tiempo y recursos.

En cuanto a la integración del instrumento, como trabajo a futuro queda pendiente la soldadura de contactos y el pegado del vidrio sin afectar la planitud del conjunto vidrio-detector. Se continuará con el desarrollo de un encapsulado para los sensores de posición apto para vuelo, que no altere las propiedades optoelectrónicas y que garantice una protección mecánica durante los procesos de integración al satélite. La propuesta es hacerlos más robustos, que no limite el campo de visión, incorporarle un interconector para evitar cables y proteger distintas zonas del sensor sobre todo por el daño por oxígeno atómico. Una vez realizado el diseño se deberá calificar el dispositivo tanto con ensayos mecánicos como ambientales.

Por último, se estudió la degradación de los parámetros eléctricos de los dispositivos simulando en el laboratorio las condiciones que experimenta en el espacio un sensor de silicio cristalino de 650 μm de espesor con una ventana de vidrio de 1 mm, en una misión de 5 años en una órbita LEO. Los resultados obtenidos muestran una disminución del 5 al 10% de la I_{CC} y hasta un 20% en condiciones de sobreirradiación en concordancia con estudios previos realizados para los sensores gruesos que tienen un nivel de maduración TRL 9 (por sus siglas en inglés, *Technology Readiness Level*).

El nivel más alto de daño se encuentra en la región tipo p del fotodiodo, esto se deduce de la disminución de la curva de respuesta espectral medida después de la irradiación, para longitudes de onda mayores a 550 nm, lo que indica que el daño es producido en el volumen del sensor. Esto era esperable, ya que a medida que disminuye la longitud de difusión, los portadores de carga pueden viajar distancias más cortas antes de recombinarse, contribuyendo menos a la corriente y, por lo tanto, disminuyendo la respuesta espectral para esas longitudes de onda.

Los trabajos desarrollados durante esta Tesis constituyeron los primeros pasos del desarrollo de sensores finos y surgieron como una continuación natural del trabajo que el Departamento Energía Solar viene realizando en dispositivos probados en vuelo o en campo como los sensores gruesos de posición, radiómetros y paneles solares para usos espaciales.

Anexo A

Estado de la técnica de sensores solares

Actualmente, los sensores solares para aplicaciones espaciales son comercializados por diversas empresas entre las que se destacan Redwire (anteriormente Adcole Maryland Aerospace) y Bradford Space, entre otras. La mayoría de los sensores solares finos (FSS) comerciales son sensores analógicos con una etapa de procesamiento, que en algunos casos puede tener una salida digital. La etapa de procesamiento necesaria en los FSS hace que el consumo de potencia de estos sensores sea mayor al de los sensores solares gruesos (CSS), que tienen cero consumos de potencia [1, 2]. Los FSS comerciales utilizan en su mayoría detectores del tipo cuatro cuadrantes como elemento sensor como son los casos de [3], [4] y [5]. En el caso de [6], se utiliza como elemento sensor un arreglo de ocho fotodiodos, de ellos se utilizan dos para medir corriente oscura de forma redundante y otros dos para detectar la presencia del Sol, igualmente de forma redundante, los restantes cuatro se utilizan para medir el ángulo solar en dos ejes, de forma redundante. Otros sensores solares que se comercializan son digitales, como son [7] y [8], fabricados por la empresa Redwire Corporation. Por otro lado, la empresa SolarMems ofrece un sensor solar con un alto nivel de integración [9]. En la Tabla A.1 y la Figura A.1 se presenta un resumen de los diferentes tipos de sensores solares que se encuentran en el mercado, así como sus principales características.

En el ámbito académico y de investigación se han presentado diversas propuestas de sensores solares finos. En los trabajos publicados, se constata una gran variedad tanto de tecnologías del detector como de geometrías de este, asimismo se observan distintas estrategias de encapsulados para dirigir la luz incidente al detector. A continuación, se mencionan algunos de estos desarrollos haciendo hincapié en las características más llamativas de cada uno.

Tabla A.1. Sensores solares comerciales.

Sensor solar / Fabricante	FOV	Precisión	Dimensiones (mm)
Coarse Sun Sensor/ Bradford Space [1]	180° x 180°	± 2°	110 x 110 x 30
Cosine Sun Sensor/ Bradford Space [10]	± 80°	± 3°	30 x 30 x 14,5
CSS-01,02 / Space Micro [2]	120°	± 5°	12,7 × 9
MSS -01, -02 / Space Micro [11]	48°/120°	± 1°	24,3 x 34,9
Fine Sun Sensor / Bradford Space [3]	128° x 128°	0,03 °	108 x 108 x 52,5
NanoSense FSS / GomSpace [5]	45°/ 60°	0,5°/ 2°	22 x 11 x 5,5
BiSon64-ET, BiSon64-ET-B, MAUS / Lens R&D [4]	64°	0,5 a 3,5°	-
FSS / Jena-Optronik [6]	128°	0,15° [3σ]	160 x 145 x 56
HFSS/ LASP [12]	± 2,5°	1"	38 x 101 x 108
Digital Sun Sensor/ Redwire Corporation [7]	± 64°	± 0,25°	96 x 94 x 53
Fine Sun Sensor/ Redwire Corporation [8]	100° x 100°	± 0,01° a ± 0,05°	-
SSOC; NanoSSOC / Solar MemS [9]	± 60°	0,5 °	43 x 14 x 5,9 / 30 x 40
NCSS-SA05 / NewSpace Systems [13]	114°	0,5°	33 x 11 x 6

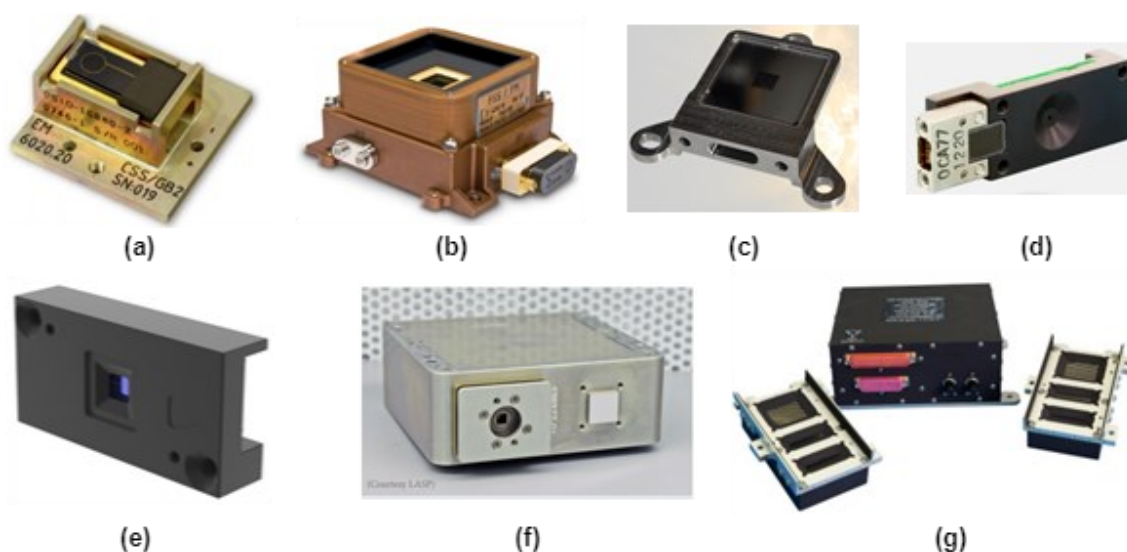


Figura A.1. Sensores solares comerciales: a) Cosine Sun Sensor [1] y b) Fine sun sensor [3] de Bradford Space, c) BiSon64-ET [4] de Lens R&D, d) NCSS-SA05 [13] de NewSpace Systems, e) NanoSense FSS [5] de GomSpace, f) HFSS [12] de LASP y g) Fine Sun Sensor [8] de Redwire Corporation.

Dentro de las propuestas que se encuentran en la literatura hay muchas que emplean detectores comerciales disponibles en el mercado (COTS, por sus siglas en inglés, Commercial Off-The-Shelf). Ejemplo de esto es el desarrollo que se presenta en [14],

donde se propone un diseño de sensor solar, pensado para pequeños satélites, que emplea fotodiodos PIN COTS, montados en dos estructuras piramidales, cada una con un sensor de temperatura para compensar la medición de los fotodiodos, Figura A.2(a). Por otro lado, las condiciones de operación de algunas misiones requieren de sensores solares con soluciones a medida. Este es el caso del FSS que se presenta en [15], el cual fue diseñado para una misión a Mercurio. El FSS utiliza como elemento sensor un detector de cuatro cuadrantes, con la particularidad de que para cumplir con los requerimientos de la misión se le incorporó un filtro de aislación de calor en la parte superior del FSS, para mantener la temperatura de trabajo del detector, Figura A.2(b). Además, se encuentran propuestas novedosas como es el caso de [16], donde se utiliza un detector de cuatro cuadrantes de 1 cm² como detector, con la característica llamativa de que la ventana que limita el paso de la luz y el detector son depósitos en las caras opuestas de una oblea de vidrio, lo que hace que la alineación de ambas capas sea con exactitud micrométrica y que se pueda pensar en una comercialización en masa lo que lo hace más económico que un producto diseñado específicamente para una misión, Figura A.2(c).

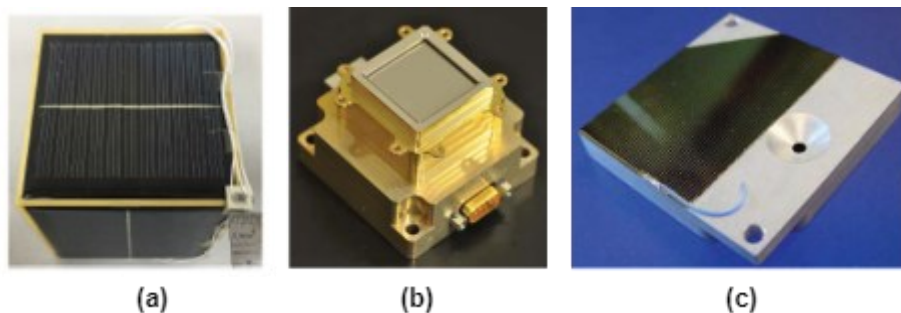


Figura A.2. a) Sensor solar con componentes comerciales [14], b) FSS diseñado a medida para una misión a Mercurio [15], c) [16].

La geometría seleccionada para el detector es un elemento en común de varios desarrollos. Este es el caso de las propuestas presentadas por [17], [18], [19] y [20] que utilizan detectores con área activa triangular (Figura A.3). El FSS que se presenta en [17] es un desarrollo del fabricante Jena Optronik, donde el detector está compuesto por cuatro pares de fotodiodos triangulares para una medición redundante de dos ejes. Sobre cada par de fotodiodos, se ubica una rendija separada una distancia dada de los fotodiodos. Lo llamativo de este diseño, además de la redundancia en los fotodiodos, es que plantea que la rendija es generada en una oblea de silicio. Por otro lado, se le aplica una capa antireflectante a los fotodiodos, y se oscurece la superficie reflectante de la rendija de silicio con una capa antireflectante de *black silicon* (nano o microestructuras de silicio cristalino sobre una superficie de silicio que hace que se vea negra [21]). Los

ocho fotodiodos tienen el ánodo común con una tensión de polarización definida de -5 V. Para prevenir que ocurra acoplamiento fotoeléctrico (*crosstalk*) entre los fotodiodos, emplean una estructura de diodo de separación, que se polariza a -2.5 V. Además, se mide la corriente oscura de forma redundante para minimizar el error de *offset*. Este sensor tiene un FOV de $\pm 64^\circ$, una sensibilidad de $0,5^\circ$. Los autores plantean la importancia de hacer un cono en el encapsulado para evitar múltiples reflexiones en ángulos de elevación muy chicos.

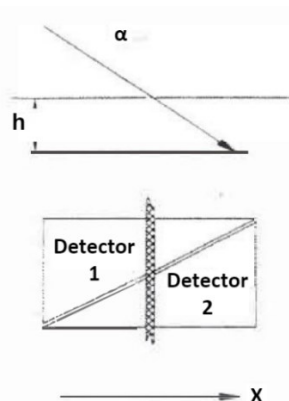


Figura A.3. FSS vista lateral y vista superior, principio de funcionamiento con detectores triangulares. [17]

En el caso de [18] y [19], además de utilizar dos fotodiodos triangulares como detectores y una ventana en forma de rendija, se le incorpora un fotodiodo rectangular que se utiliza como referencia para eliminar parámetros indeseados. Lo interesante de esta propuesta es que los fotodiodos son elaborados en la capa superior de una oblea SOI (por sus siglas en inglés, *Silicon On Insulator*), lo cual permite la aislación eléctrica entre los fotodiodos al eliminar la capa de Si y de SiO₂ entre los fotodiodos. Los contactos son elaborados en la cara frontal y la rendija se elabora en una oblea pírex soldada al sustrato (*wafer bonding*), Figura A.4.

Al igual que en los trabajos anteriores, en [20] se presenta un sensor solar que utiliza como elemento sensor dos fotodiodos triangulares de 2,8 x 1 mm por cada eje. Los fotodiodos están aislados del sustrato por una capa de óxido. El sensor tiene una rendija de 250 μm de ancho y 6 mm de largo, elaborada con una capa fina de cromo. La geometría de las celdas está diseñada de forma tal que la suma de las áreas iluminadas en ambas celdas sea constante en todo el rango. La respuesta combinada de las celdas se puede utilizar como detector de presencia del Sol, Figura A.5.

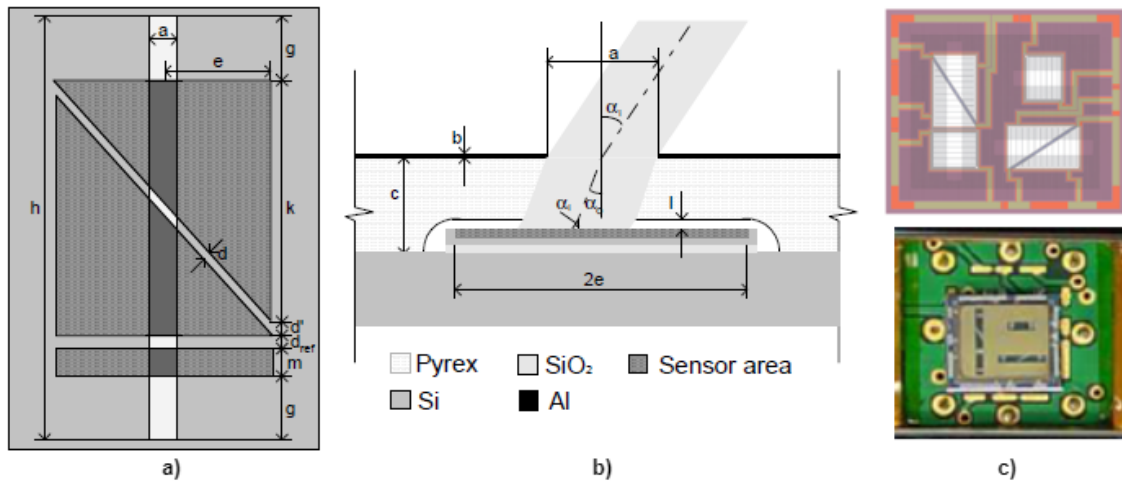


Figura A.4. a) Vista superior FSS con áreas activas triangulares y rectángulo de referencia b) vista transversal c) FSS dos ejes, diseño y sensor terminado. [18, 19]



Figura A.5. FSS con fotodiodos triangulares. [20]

Otras geometrías del detector se pueden encontrar en [22], [23] y [24]. Los dos primeros son desarrollos de un mismo grupo de autores, donde el detector es un conjunto de fotodiodos rectangulares, mientras que el tercero es un sensor donde emplean un detector de cuatro cuadrantes comercial con geometría y ventana circular (Figura A.6).

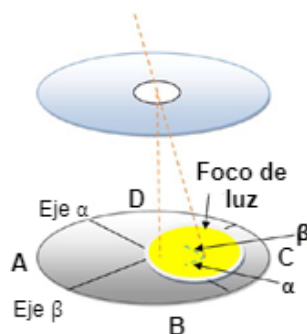


Figura A.6. FSS con detector de cuatro cuadrantes comercial y ventana circular. [24]

El FSS que se presenta en [22], es un diseño de 3 x 3 cm que consiste en dos pares de fotodiodos con geometría rectangular integrados en un substrato de Si, con los dos pares se logra una medición en dos ejes del vector solar con FOV de 120° y resolución de 0,15°. El sensor está conformado por los fotodiodos, un vidrio que lo protege del daño

por radiación y dos ventanas rectangulares que limitan la luz. Las ventanas se elaboraron con una metalización de 150 nm de Ti/Pd en el vidrio protector y el vidrio se pega a los detectores utilizando silicona certificada para uso espacial, Figura A.7(a). En el caso de [23], se presenta un FSS con resolución de $0,1^\circ$. La mejora se basa en que a menor FOV se logra una mejor resolución en la medición, por lo que los autores optan por segmentar el FOV en tres regiones. Para la medición de cada eje emplean tres pares de fotodiodos, que miden las distintas regiones del FOV, y para lograr esto modifican el ángulo central de los sensores al desplazar la ubicación de la ventana correspondiente a cada par de fotodiodo, Figura A.7(b). Los tres pares de fotodiodos están integrados en un sustrato de Si y solo aclaran que la separación entre cada par de fotodiodos es suficiente para que no interfieran en el funcionamiento de los otros. A diferencia del trabajo anterior, la ventana se obtiene depositando aluminio, Figura A.7(c).

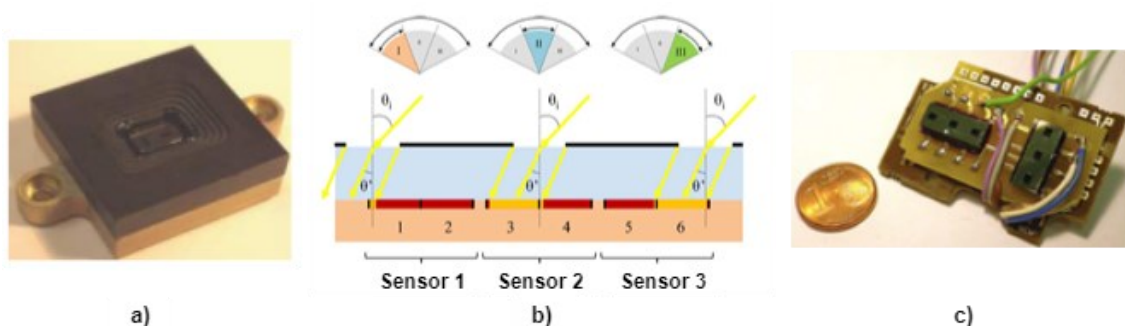


Figura A.7. a) FSS de dos ejes con detectores rectangulares [22], b) segmentación del FOV para lograr mayor resolución y c) FSS de dos ejes con segmentación del FOV [23].

Una propuesta distinta en cuanto a cómo se hace incidir la luz en el detector se presenta en [25], donde utilizan un detector de cuatro cuadrantes y una ventana formada por cuatro rendijas, que forman un cuadrado en la cara interna y por la cara externa tienen curvas iguales. Con esta forma de la rendija eliminan la no linealidad que existe entre la posición de la luz y el ángulo de inclinación de la fuente (Figura A.8).

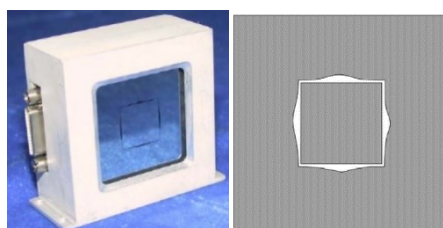


Figura A.8. FSS con rendija diseñada para compensar la no linealidad del detector [25]

La mayoría de los FSS reportados en la literatura utilizan una ventana o rendija para limitar la cantidad de luz que llega al elemento sensor, en [26, 27] y [28] se presenta un

enfoque diferente. En [26, 27], se emplea un encapsulado maquinado en forma de cruz con paredes de 0,5 mm de espesor con el objetivo de hacerle sombra al detector de cuatro cuadrantes, Figura A.9(a). Por otro lado, el diseño que se presenta en [28] emplea tres áreas activas independientes y la ventana que limita la luz es una cruz, con esto se logra que el sensor mida en dos ejes, Figura A.9(b) y (c).

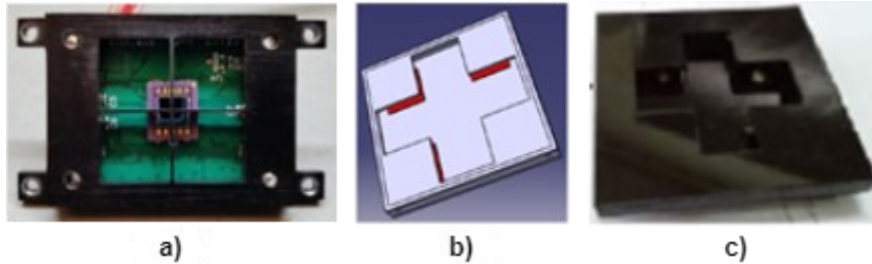


Figura A.9. a) FSS con encapsulado maquinado que sombrea el detector [27] b) y c) FSS de dos ejes con tres detectores y ventana en forma de cruz [28].

Los sensores que se mencionan a continuación, a diferencia de los anteriores, utilizan detectores con tecnología CCD o CMOS APS. En [29], se presenta un sensor solar de dos ejes basado en un arreglo CCD lineal comercial. Para obtener la medición en dos ejes utilizan una rendija en forma de N de manera que el arreglo lineal de CCD se ilumina en tres puntos, dos que siempre se encuentran a la misma distancia entre sí y el punto central varía su posición con respecto a los focos de los extremos dependiendo de la posición del Sol. La rendija se fabricó con un depósito de cromo, Figura A.10.

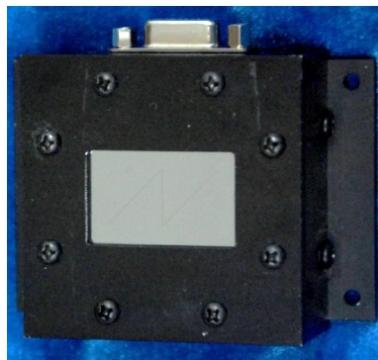


Figura A.10. FSS con detector CCD y rendija en forma de N [29].

En la bibliografía, se pueden encontrar varias propuestas de sensores solares finos basados en APS, con diferentes particularidades. En la mayoría de los casos se utilizan APS comerciales [30, 31, 32, 33] (Figura A.11) y un diseño más interesante se puede encontrar en [34] y [35] (Figura A.12), donde el APS forma parte de un ASIC (circuito integrado para aplicaciones específicas) que integra el detector con el circuito de lectura, procesamiento y comunicación. Otras características llamativas del μ DSS propuesto en

[34] son, la incorporación de una celda solar de alta eficiencia como fuente de energía y una antena RF para transmitir la información de la medición, lo que hace que el sensor sea autónomo y sin cables. Los autores plantean que es un sensor pensado para microsátélites donde factores como el peso, el consumo de potencia y el costo son factores limitantes.

Un aspecto interesante en este tipo de sensores es la selección del tipo de ventana, en [30, 31, 35] utilizan una única apertura con diámetro en el rango de las decenas de micrones y en [30] la ventana que emplean es un componente óptico comercial con una apertura de 20 μm de diámetro y 25 μm de espesor. Un enfoque distinto se plantea en [32, 33], con una ventana con múltiples aperturas que se elaboró a partir de una lámina de acero, ordenadas en un arreglo de 10 x 10, lo que posibilita la adquisición simultánea de 100 focos, que se promedian para obtener una medición más precisa del ángulo solar, a costo de reducir el FOV. Por otro lado, en [31] y [35] se plantea la necesidad de emplear filtros para proteger el detector.

Una característica llamativa de este tipo de sensores se presenta en [31, 32, 33, 35], donde el FOV puede ser programable dependiendo de la cantidad de píxeles que se utilicen para procesar la imagen, es decir, pueden trabajar en distintos modos de operación dependiendo de la resolución con que se requiera la medición. Pueden trabajar en modo grueso o de detección y en modo fino o de seguimiento, la diferencia entre ambos modos es el algoritmo de centroide que utilizan para obtener el vector solar. En el modo fino, el FOV es mucho más reducido que en el modo grueso, ya que buscan el centro del foco solamente procesando los píxeles iluminados y no toda el área del detector, lo cual también hace que la medición sea más rápida y precisa.

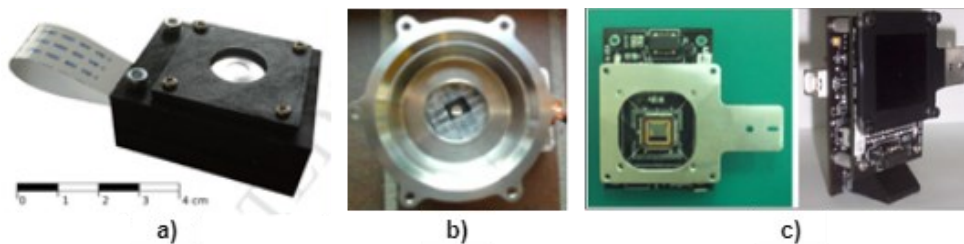


Figura A.11. FSS con detector APS comercial a) [30] b) [31] c) [32, 33].

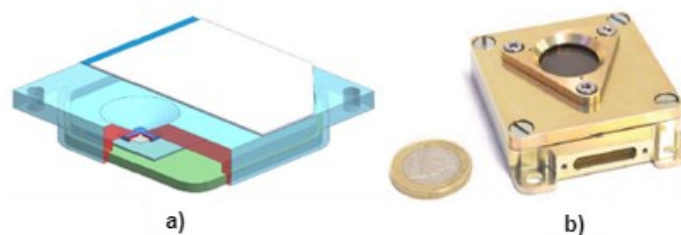


Figura A.12. FSS donde el APS forma parte de un ASCI, a) [34] b) [35].

Los trabajos presentados por [36] y [37] tienen en común que el detector utilizado es un PSD comercial. En el primero, [36], la imagen en el detector se logra a través de una apertura en un diafragma en forma de V y este sensor solar fue verificado en órbita, Figura A.13(a). En [37], el FSS tiene como aplicación apuntar al Sol un instrumento científico a bordo de la estación espacial internacional, el detector empleado es un componente COTS (Hamamatsu S2044). El sensor está compuesto por un filtro para atenuar la intensidad de la luz en conjunto con un sistema de lentes que conforman la imagen que llega al detector, Figura A.13(b).

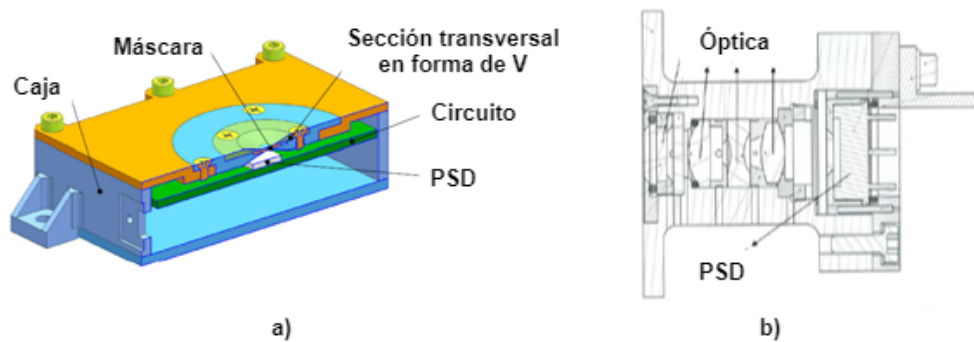


Figura A.13. FSS con detector tipo PSD comercial a) [36] b) [37].

Entre los trabajos consultados, las propuestas de sensores solares más inusuales son las que se presentan en [38] y [39]. En el primero, [38], el detector es un domo de vidrio con una capa fotosensible CIGS, mientras que el detector del segundo, [39], es un detector de cuatro cuadrantes flexible con fotodiodos orgánicos, impresos mediante *Inkjet* (OPDs), Figura A.14 y Figura A.15.

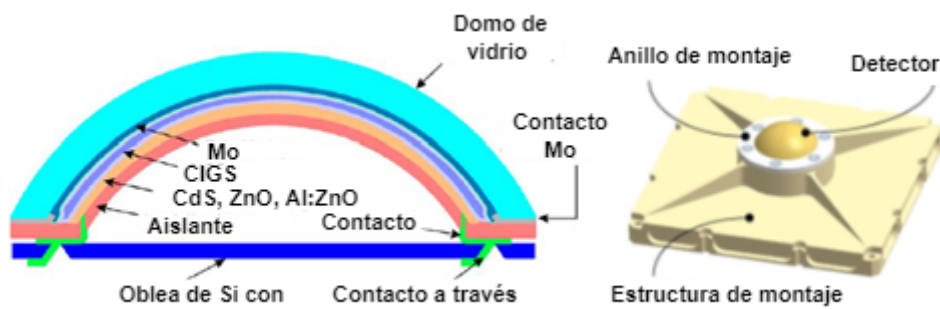


Figura A.14. FSS con detector CIGS. [38]

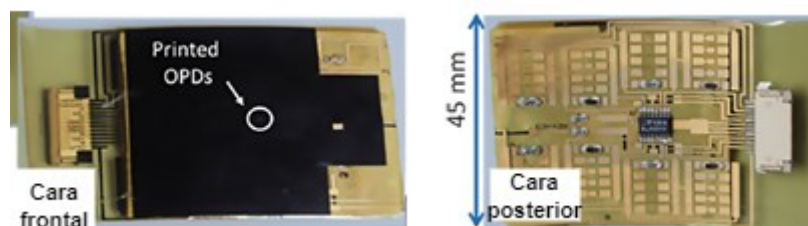


Figura A.15. Sensor solar flexible y con fotodiodos orgánicos impresos. [39]

A. Estado de la técnica de sensores solares de posición

Por otro lado, en [40], se presenta una alternativa para eliminar la influencia de la luz difusa del albedo, utilizando filtros o detectores de espectro selectivo como es el caso de los detectores de radiación ultravioleta.

En la Tabla A.2 se presenta un resumen de los sensores mencionados anteriormente, así como sus dimensiones, resolución y FOV.

Tabla A.2. Sensores solares.

Publicación	Detector	FOV	Dimensiones	Precisión
VectorSol NANOSAT-1B [22]	Pares de fotodiodos integrados por cada eje	$\pm 60^\circ$	30 x 30 x 12	0,15°
High-precision solar sensor [23]	3 pares de fotodiodos por cada eje y segmentación del FOV	$\pm 60^\circ$	-	0,1°
BepiColombo Fine Sun Sensor [15]	Detector de cuatro cuadrantes	$\pm 32^\circ$	40 x 40	-
WFSS, CRQS NASA [26, 27]	Cruz mecanizada encima un detector de cuatro cuadrantes comercial		32x25x6	1'
Low-Cost Sun Sensor Using Quadphotodiode [24]	Ventana circular, detector de cuatro cuadrantes comercial	60 x 60°	-	1°
Digital Sun Sensor Technology with an N-Shaped Slit Mask [29]	CCD lineal y rendija en forma de N	$\pm 60^\circ \times \pm 60^\circ$	-	0,08°
MSS [32, 33]	APS comercial y ventana con múltiples aperturas	$[-20^\circ:20^\circ] \times [-10^\circ:10^\circ]$	-	0,01°
Low-cost sun sensor [30]	CMOS APS comercial	66,2 x 51,1°	-	0,023°
Active Pixel Digital Sun Sensor [31]	CMOS APS	120 x 120°	-	0,018°
MiniDSS [35]	APS integrado con algoritmo de procesamiento	102 x 102°	69x52x14	0,03°
Two-Axis MOEMS Sun Sensor [18] [19]	Fotodiodos triangulares y rectángulo de referencia	$\pm 70^\circ$	7 x 8	1°
MEMS-Based Dual-Axis Sun Sensor [20]	Pares de fotodiodos triangulares	$\pm 30^\circ$	-	0,5°
Analogue sun sensor [25]	Detector de cuatro cuadrantes y ventana con compensación de alinealidad óptica	$\pm 62^\circ$	50 x 50 x 25	0,2°
Sun sensor Hybrid Integration [39]	Fotodiodos orgánicos impresos y flexibles (OPDs)	$\pm 60^\circ$	-	6°
Low-Cost MEMS Sun Sensor [28]	Tres fotodiodos	$\pm 70^\circ$	-	-

<i>Sun sensor [36]</i>	<i>PSD</i>	$120 \times 120^\circ$	$78 \times 77 \times 21$	6"
<i>Optical sun sensor [37]</i>	<i>PSD comercial</i>	12°		1'
<i>MOEMS sun sensor [38]</i>	<i>Domo CIGS</i>	$\pm 90^\circ$	70	1°

Referencias

- [1] Bradford Space, «<https://www.bradford-space.com/products/css,>» [En línea]. [Último acceso: 09 10 2024].
- [2] Space Micro, «<https://www.spacemicro.com/products/electro-optics-star/COARSE%20SUN%20SENSORS.pdf,>» [En línea]. [Último acceso: 09 10 2024].
- [3] Bradford Space, «<https://www.bradford-space.com/products/fss,>» [En línea]. [Último acceso: 09 10 2024].
- [4] Lens Research & Development, «<https://lens-rnd.com/products/-bison64-et-fm,>» [En línea]. [Último acceso: 10 2024].
- [5] GomSpace, «[https://gomspace.com/shop/subsystems/attitude-orbit-control-systems/nanosense-fss-\(1\).aspx,](https://gomspace.com/shop/subsystems/attitude-orbit-control-systems/nanosense-fss-(1).aspx,)» 2019. [En línea]. [Último acceso: 10 2024].
- [6] Jena-Optronik GmbH, «<https://www.jena-optronik.de/company/references/fine-sun-sensor-fss.html,>» [En línea]. [Último acceso: 10 2024].
- [7] Redwire Corporation, «<https://redwirespace.com/wp-content/uploads/2023/06/redwire-digital-sun-sensor-64-flysheets.pdf,>» [En línea]. [Último acceso: 10 2024].
- [8] Redwire Corporation, «<https://redwirespace.com/wp-content/uploads/2023/06/redwire-fine-sun-sensor-50-flysheets.pdf,>» [En línea]. [Último acceso: 10 2024].
- [9] Solar MEMS Technologies S.L., «<http://www.solar-mems.com/space-equipment/#,>» [En línea]. [Último acceso: 10 2024].
- [10] Bradford Space, «<https://www.bradford-space.com/products/coss,>» [En línea]. [Último acceso: 09 10 2024].
- [11] Space Micro, «<https://www.spacemicro.com/products/electro-optics-star/MEDIUM%20SUN%20SENSORS.pdf,>» [En línea]. [Último acceso: 09 10 2024].

- [12] LASP, «<https://lasp.colorado.edu/wp-content/uploads/2018/07/700.Fine-Sun-Sensor.pdf>,» [En línea]. [Último acceso: 10 2024].
- [13] NewSpace Systems (NSS), «https://www.newspacesystems.com/wp-content/uploads/2022/07/NewSpace-Sun-Sensor_V11.2.pdf,» [En línea]. [Último acceso: 10 2024].
- [14] X. Lü, Y. Tao, K. Xie, S. Wang, X. Li, W. Bao y R. Chen, «A photodiode based miniature sun sensor,» *Measurement Science and Technology*, vol. 28, 2017.
- [15] E. Boslooper, N. v. d. Heiden, D. Naron, R. Schmits, J. J. v. d. Velde y J. v. Wakeren, «BepiColombo Fine Sun Sensor,» de *International Conference on Space Optics — ICSO 2012*, Ajaccio, Corse, 2012.
- [16] J. Leijtens y K. d. Boom, «Micro optical sensor system for sunsensing applications,» de *International Conference on Space Optics - ICSO 2006*, 2006.
- [17] K. Schroter, E. Strumpf y W. Reich, «Development and application of a fine sun sensor,» de *International Conference on Space Optics — ICSO 1997*, Toulouse, Francia, 1997.
- [18] M. Pedersen, J. H. Hales y R. W. Fléron, «Linear Two-Axis MOEMS Sun Sensor and the Need for MEMS in Space,» de *54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law*, Bremen, Germany, 2003.
- [19] J. H. Hales y M. Pedersen, «Two-Axis MOEMS Sun Sensor for Pico Satellites,» de *16th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2002.
- [20] M. Abhilash, S. Kumar, S. Sandya, T. V. Sridevi y H. R. Prabhamani, «Implementation of the MEMS-Based Dual-Axis Sun Sensor for Nano Satellites,» de *2014 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, Benevento, Italy, 2014.
- [21] X. Liu, P. R. Coxon, M. Peters, B. Hoex, J. M. Cole y D. J. Fray, «Black silicon: fabrication methods, properties and solar energy applications,» *Energy Environ. Sci.*, vol. 7, p. 3223–3263, 2014.
- [22] P. Ortega, G. López-Rodríguez, J. Ricart, M. Domínguez, L. M. Castañer, J. M. Quero, C. L. Tarrida, J. García, M. Reina, A. Gras y M. Angulo, «A Miniaturized Two Axis Sun Sensor for Attitude Control of Nano-Satellites,» *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, nº 10, pp. 1623-1632, 2010.

- [23] F. J. Delgado, J. M. Quero, J. García, C. L. Tarrida, P. R. Ortega y S. Bermejo, «Accurate and Wide-Field-of-View MEMS-Based Sun Sensor for Industrial Applications,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, nº 12, p. 4871–4880, 2012.
- [24] I. Maqsood y T. Akram, «Development of a Low Cost Sun Sensor Using Quadphotodiode,» de *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, 2010.
- [25] F. Chen y J. Feng, «Analogue Sun Sensor Based on the Optical Nonlinear Compensation Measuring Principle,» *Measurement Science and Technology*, vol. 18, nº 7, p. 2111–2115, 2007.
- [26] NASA.gov, 2013. [En línea]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20130014452>.
- [27] NASA, 2017. [En línea]. Available: <https://techport.nasa.gov/view/40647>.
- [28] J. A. Bahrampoor y A. Naghash, «Design, Fabrication, and Test of a Low-Cost MEMS-Based Sun Sensor.,» de *2018 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (IcRoM)*, Tehran, Iran, 2018.
- [29] M.-S. Wei, F. Xing, B. Li y Z. You, «Investigation of Digital Sun Sensor Technology with an N-Shaped Slit Mask,» *Sensors*, vol. 11, pp. 9764-9777, 2011.
- [30] A. Antonello, L. Olivieri y A. Francesconi, «Development of a Low-Cost Sun Sensor for Nanosatellites,» *Acta Astronautica*, vol. 144, p. 429–436, 2018.
- [31] A. Muhammad Awais Arshad, M. Fayyaz y A. S. Jawad Khalid Qureshi, «Active Pixel Digital Sun Sensor for Satellites,» de *2018 International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2018.
- [32] G. Rufino and M. Grassi, "Multi-Aperture CMOS Sun Sensor for Microsatellite Attitude," *Sensors*, vol. 9, pp. 4503-4524, 2009.
- [33] G. Rufino and M. Grassi, "Digital Sun Sensor Multi-Spot Operation," *Sensors*, vol. 12, pp. 16451-16465, 2012.
- [34] C. d. Boom, J. Leijtens, L. v. Duivenbode y N. v. d. Heiden, «Micro Digital Sun Sensor: System in a Package,» de *Proceedings of the 2004 International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems (ICMENS'04)*, 2004.
- [35] B. d. Boer, M. Durkut, E. Laan, H. Hakkesteegt, J. Leijtens, E. Urquijo, P. Bruins, A. Theuwissen y N. Xie, «MiniDSS: a Low-Power and High-Precision Miniaturized Digital Sun Sensor,» de *International Conference on Space Optics — ICSSO 2012*, Ajaccio, Corse, 2012.

- [36] L. Lin, Z. Sitong, T. Luyang y W. Dong, «Sun sensor design and test of a micro satellite,» *Journal of Measurements in Engineering*, vol. 4, nº 3, pp. 148-155, 2016.
- [37] N. Pereira, D. Bolsée, D. Sluse, A. Michel, M. Meftah, L. Damé y A. Irbah, «Design of an Optical Sun Sensor for a Space Application: a Reliable Passive Sun Tracking Device for the SOLAR/SOLSPEC Instrument.,» de *Optical Sensors 2017*, 2017.
- [38] T. Böhnke, M. Edoff y L. Stenmark, «Development of a MOEMS sun sensor for space applications,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 130, p. 28, 2006.
- [39] N. Marjanović, J. Dissler, F. Zanella, J. Schleuniger, A. Mustaccio, R. Ferrini, M. Schnieper y E. Assaf, «Hybrid Integration; Case Study with Sun Sensor for Cube Satellites.,» de *Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017*, 2017.
- [40] J. Romijn, S. Vollebregt, V. G. d. Bie, L. M. Middelburg, B. E. Mansouri, H. W. v. Zeijl, A. May, T. Erlbacher, J. Leijtens, G. Zhang y P. M. Sarro, «Microfabricated albedo insensitive sun position sensor system in silicon carbide with integrated 3D optics and CMOS electronics,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 354, p. 114268, 2023.

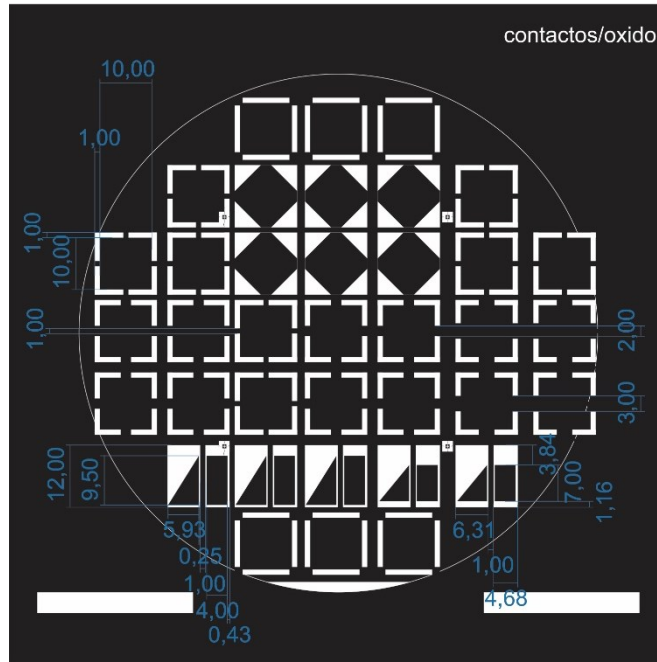


Figura B.2. Máscara 2^{do} paso de fotolitografía para la definición de los contactos metálicos, arreglos de 2 y 4 fotodiodos, difusión 387.

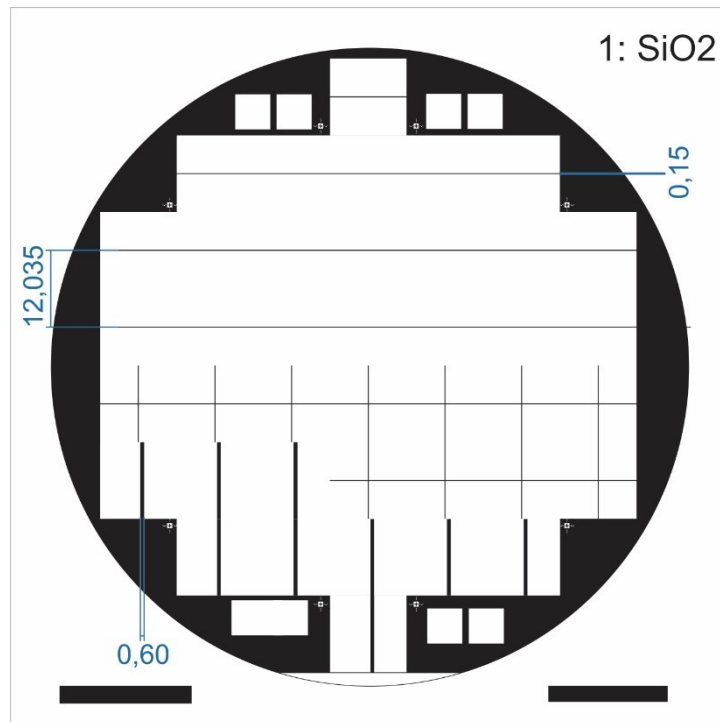


Figura B.3. Máscara 1^{er} paso de fotolitografía, definición de la máscara de SiO₂, arreglos de 2 y 4 fotodiodos, difusión 389.

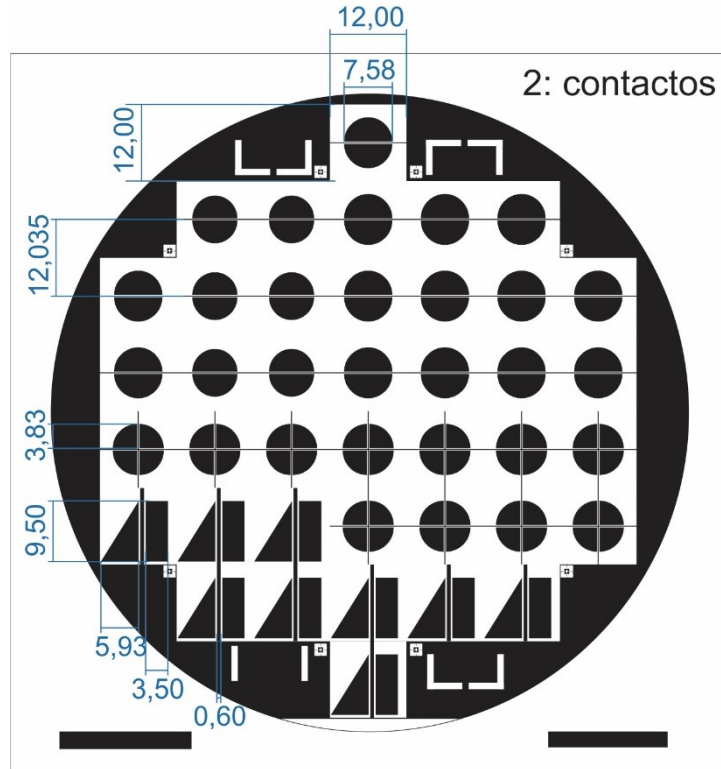


Figura B.4. Máscara 2^{do} paso de fotolitografía para la definición de los contactos metálicos, arreglos de 2 y 4 fotodiodos, difusión 387.

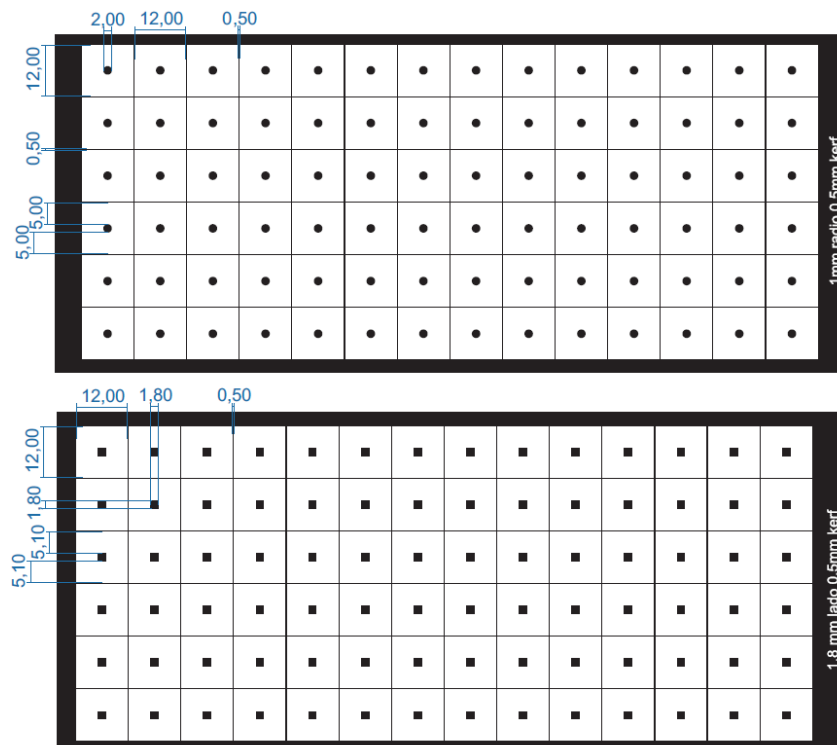


Figura B.5. Máscaras de fotolitografía para definir la metalización de las ventanas circular y cuadrada.

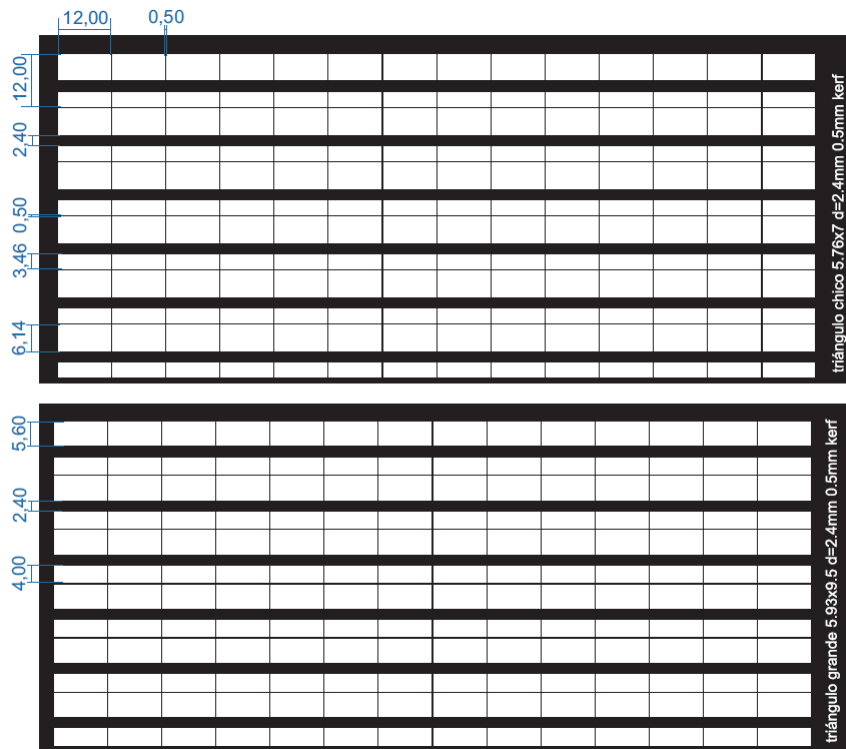


Figura B.6. Máscaras de fotolitografía para definir la metalización de las ventanas para sensores con fotodiodo triangular grande y chico.