



Trabajo de Fin de Máster
“Máster Universitario en Microelectrónica:
Diseño y Aplicaciones de Sistemas
Micro/Nanométricos”

**Caracterización experimental de prototipos de
sensores solares para navegación espacial**

Autora: María López Carmona
Tutor: Juan Antonio Leñero Bardallo
6 de septiembre de 2021

Agradecimientos

Tras haber realizado este Trabajo Fin de Máster, me gustaría agradecer a todas las personas que lo han hecho posible aportando sus conocimientos, ayuda y apoyo.

En especial a mi tutor Juan Antonio Leñero, por su guía, tiempo, dedicación y por haberme dado esta oportunidad. También me gustaría agradecerle a Rubén Gómez su gran ayuda y aportación en la realización de este trabajo.

A mi familia, gracias por estar siempre y por el apoyo constante.

Resumen

En este Trabajo Fin de Máster (TFM) se han caracterizado experimentalmente dos prototipos de sensores solares asíncronos para navegación espacial que operan en la región fotovoltaica. Los sensores solares son dispositivos muy demandados que sirven para medir la posición relativa del Sol con respecto al sensor con el fin de determinar y controlar la actitud de los diversos sistemas de navegación espacial.

A lo largo de este trabajo se exponen las ventajas que presentan estos dispositivos frente a los sensores convencionales síncronos comerciales, como son la baja latencia, reducido consumo, bajo ancho de banda y disminuida tasa de flujo de datos transmitidos al exterior; especificaciones que los convierten en dispositivos muy competitivos en el mercado de los sistemas de navegación espacial.

Las tareas principales del trabajo han abarcado la puesta en marcha de los diversos experimentos necesarios, la toma de medidas, su análisis y la elaboración de informes de los resultados obtenidos. Se reportan a lo largo de la memoria las características estáticas, método de calibración, precisión, resolución espacial, angular y temporal, tiempo de respuesta y el consumo de potencia de los dos tipos de sensores solares. Finalmente, se realiza una comparativa con diversos sensores solares del estado del arte de estos dispositivos, recalcando las ventajas y limitaciones que presentan los sensores caracterizados en este estudio. Los resultados obtenidos indican que los prototipos son mejores candidatos frente al arte en términos de consumo, latencia y ancho de banda.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
Índice general	VIII
Índice de tablas	IX
Índice de figuras	XIII
Lista de abreviaturas	XV
1. Introducción y motivación	1
2. Revisión del arte	3
2.1. Física de semiconductores	3
2.1.1. La unión PN	5
2.1.2. Diodos bajo iluminación	6
2.1.3. Diodos como celdas solares	8
2.2. Sensores solares	10
2.2.1. Sensor solar analógico	10
2.2.2. Sensor solar digital	11
2.2.3. Sensores de visión asíncronos	12
2.3. Protocolo de comunicación AER	14
2.4. Objetivos y alcance del trabajo	16
3. Descripción del sistema	19
3.1. Principio de operación del sensor solar	19
3.2. Estructura de los sensores solares	21
3.2.1. Esquemático del píxel del sensor octopus	22
3.2.2. Esquemático del píxel del sensor continuo	26
3.3. Modos de operación	29
3.4. Circuitería digital para el cálculo del centroide	30
3.4.1. Determinación centroide con el sensor octopus	30

3.4.2. Determinación centroide con el sensor continuo	32
4. Resultados de la caracterización experimental	35
4.1. <i>Setup</i> experimental para la calibración	35
4.2. Características estáticas del sensor octopus	38
4.2.1. Influencia del número de píxeles considerados para el cálculo del centroide	41
4.3. Características estáticas del sensor continuo	42
4.4. Exactitud y precisión	44
4.4.1. Exactitud y precisión del sensor octopus	44
4.4.2. Exactitud y precisión del sensor continuo	46
4.5. Consumo de corriente	47
4.5.1. Consumo de corriente del sensor octopus	48
4.5.2. Consumo de corriente del sensor continuo	48
4.6. Resolución temporal	49
4.6.1. Resolución temporal del sensor octopus	50
4.6.2. Resolución temporal del sensor continuo	51
4.7. Sensibilidad del fotodiodo y dependencia de V_{oc} con la iluminación	53
4.8. Tiempo de respuesta	55
4.8.1. Latencia del sensor octopus	55
4.8.2. Latencia del sensor continuo	55
4.9. Resumen de las características de los sensores solares	56
4.10. Comparación del estado del arte	57
5. Conclusiones y líneas futuras	61
Bibliografía	66

Índice de tablas

4.1. Distancia Focal (FD) de los prototipos de sensores solares para las diferentes láminas empleadas como óptica. La lámina de cobre tiene un diámetro de 0.1 mm, y la de aluminio de 0.3 mm.	37
4.2. Tabla comparativa de las características estáticas de los dos prototipos de sensores solares estudiados. Se presentan los resultados con el modo con el que mejor resultados se obtienen.	44
4.3. Tabla comparativa dispersión en las medidas con los diferentes modos de operación del sensor octopus.	45
4.4. Resultados precisión sensor octopus.	46
4.5. Estudio de la dispersión de las medidas empleando el sensor de operación continuo.	46
4.6. Resultados precisión sensor continuo.	47
4.7. Comparación del estado del arte de los sensores solares.	59

Índice de figuras

2.1.1. Estructura de bandas de energía en materiales de tipo (a) aislante, (b) semiconductor, y (c) metal. E_f es la energía de Fermi, mientras que BC y BV hacen referencia a la banda de conducción y de valencia, respectivamente.	4
2.1.2. Diagrama de bandas de energía de la unión PN en equilibrio.	5
2.1.3. (a) Símbolo de la unión PN, diodo. K y A hacen referencia al cátodo y ánodo, respectivamente. (b) Curva I-V característica de la unión PN polarizada.	6
2.1.4. (a) Representación I-V mostrando los regímenes de operación de un diodo bajo iluminación. Cuando opera en el tercer cuadrante, el dispositivo actúa como un fotodetector, mientras que en el cuarto cuadrante se comporta como una celda solar. (b) La corriente de polarización inversa aumenta a medida que la intensidad de la luz se incrementa. $G_L = 0$ portadores/segundo indica ausencia de iluminación.	7
2.1.5. (a) Representación del cuadrante de la característica I-V del diodo tomando la corriente en sentido contrario. (b) Curva P-V. El punto de operación óptimo (I_{mpp} , V_{mpp}) proporciona la máxima energía que puede ser almacenada. (c) Modelo del circuito para un diodo operando como celda solar.	9
2.2.1. (a) Sensor solar digital de dos ejes. (b) Esquema representativo de los ángulos que determinan la posición relativa del Sol (<i>latitud</i> , <i>azimut</i>).	10
2.2.2. Esquema simplificado de un sensor solar analógico que consta de dos fotodiodos para medir un ángulo de incidencia.	11
2.2.3. (a) Arquitectura de un sensor solar convencional. (b) Esquema de lectura de la matriz de píxeles. Se encuentra recuadrada la Región de Interés (ROI), que se corresponde con la zona de píxeles iluminados.	12
2.2.4. Diagrama de bloques simplificado de un píxel cuyos pulsos transmitidos son proporcionales a la intensidad de la luminosidad. Cada vez que tiene lugar un pulso, se transmite de forma asíncrona las coordenadas del píxel al exterior del chip.	13
2.3.1. Líneas de comunicación entre el dispositivo emisor y el receptor, junto con un cronograma de las señales involucradas en el protocolo de comunicación AER. El emisor es la matriz de píxeles y el receptor, el periférico externo que almacena la información.	14
2.3.2. (a) Bloque básico de un arbitrador. (b) Árbol de siete arbitradores. Las entradas son req_0 y req_1 , y sus salidas respectivas ack_0 y ack_1	15
2.3.3. Arbitrador greedy con dos entradas.	16

3.1.1. Implementación del sistema. Existe una cubierta opaca con un orificio que cubre la matriz de píxeles, a través del cual entran los rayos de luz. (a) Esquema de los diferentes parámetros de diseño y los ángulos de interés; (b) el sensor físico junto con la lámina de aluminio	19
3.2.1. Microfotografía del chip donde están integrados los dos tipos de sensores solares.	21
3.2.2. Configuración del fotodiodo operando como celda solar junto con su circuito equivalente.	22
3.2.3. Símbolo representativo de las entradas y salidas del esquemático del píxel.	23
3.2.4. Esquemático del píxel del sensor octopus, compuesto por un fotodiodo operando como celda solar, un transistor de reset, un comparador y dos transistores de pull-up.	24
3.2.5. Esquemático del comparador utilizado en el píxel del sensor octopus. La señal <i>enable</i> si no está activada, establece la salida a nivel bajo.	24
3.2.6. Cronograma de las señales involucradas en la operación del píxel.	25
3.2.7. Diagrama de los principales bloques del sistema. El bloque central es la matriz de píxeles, y en la periferia se encuentra la lógica asíncrona para la comunicación entre los píxeles y el exterior mediante una FPGA.	26
3.2.8. Símbolo representativo de las entradas y salidas del esquemático del píxel.	27
3.2.9. Esquemático del píxel del sensor de operación continua, compuesto por un fotodiodo operando como celda solar, un transistor de reset, un comparador y dos transistores de pull-up.	27
3.2.10. Esquemático del comparador empleado en el píxel del sensor continuo. La señal <i>enable</i> si no está activada, establece la salida a nivel bajo.	28
3.2.11. Diagrama de los principales bloques del sensor continuo. El bloque central es la matriz de píxeles y en la periferia se encuentra la lógica digital encargada de calcular el centroide de la región iluminada.	28
3.4.1. Esquema del algoritmo que determina el centroide de la región iluminada.	31
3.4.2. (a) Esquema de la lógica circuital que calculo el centroide de la región iluminada. (b) Información que proporciona el sensor al exterior, se corresponde las coordenadas (x_c, y_c)	33
3.4.3. Esquema de las diferentes etapas que constituyen el bloque encargado de la determinación del centroide de la región iluminada.	33
4.1.1. <i>Setup</i> experimental para medir las características estáticas de los sensores solares y los errores del (a) azimuth y (b) latitud.	36
4.1.2. (a) Microfotografía del chip. (b) Foto del sensor incluyendo la lámina de aluminio con el orificio de 0.3 mm de diámetro.	37
4.1.3. (a) Representación de la posición del centroide de la región iluminada en función de la latitud empleando el sensor solar continuo con las dos tipos de cubiertas, de cobre con un diámetro de 0.1 mm y de aluminio, de 0.3 mm. (b) Trayectoria seguida por el foco de luz en el experimento llevado a cabo para la calibración del azimuth empleando las dos láminas.	38

4.2.1. Representación gráfica de las medidas experimentales de los ángulos que determinan la posición del Sol, latitud a la izquierda y azimut a la derecha, en función de sus valores teóricos. Las gráficas inferiores se corresponden con el error cometido en la medición en cada ángulo en función del valor teórico. 39

4.2.2. Respuesta del píxel cuando el sensor se expone a un foco de luz. 41

4.2.3. Error absoluto cometido en el cómputo del centroide de la región iluminada en función del número de píxeles iluminados que se consideran. La referencia es el centroide considerando todo el área. 42

4.3.1. Representación gráfica de las medidas experimentales de los ángulos que determinan la posición del Sol, latitud a la izquierda y azimut a la derecha, en función de sus valores teóricos. Las gráficas inferiores se corresponden con el error cometido en la medición en cada ángulo en función del valor teórico. 43

4.4.1. (a) Representación de las coordenadas del centroide a lo largo de la trayectoria para los tres modos de operación. El color azul representa el modo continuo con reset, el verde sin reset y el rojo el modo TFS. (b) Histograma de la latitud medida a lo largo de la trayectoria circular. Azul indica el modo TFS, naranja con reset, y amarillo sin reset. 45

4.4.2. (a) Representación de las medidas de las coordenadas del centroide a lo largo de la trayectoria (b) Histograma de la latitud medida a lo largo de la trayectoria circular. 47

4.5.1. Consumo de corriente del sensor octopus en función del número de frames por segundo. 48

4.5.2. Consumo de corriente del sensor continuo (a) en función del número de frames por segundo, y (b) en función del tiempo de integración. 49

4.6.1. Seguimiento del parpadeo del láser a una frecuencia de 200 Hz. 50

4.6.2. Representación de las medidas correspondientes a la trayectorias seguidas por el foco de luz; diagonal (izquierda) y circular (derecha), junto con la latitud y azimut correspondiente a cada punto empleando el sensor octopus. 50

4.6.3. (a) Tensión del fotodiodo a lo largo del tiempo, donde se observa el tiempo que tarda en descargarse el fotodiodo operando en el modo continuo. (b) Centroide de la región iluminada a lo largo del tiempo con diferentes tensiones umbrales. (c) Imagen ideal. (d) Imagen en movimiento ilustrando la estela luminosa. (e) Resultados simulación al cambiar V_{th} 52

4.6.4. Representación de las medidas de las trayectorias diagonal (izquierda) y circular (derecha) seguida por la bombilla, junto con la latitud y azimut correspondiente a cada punto empleando el sensor de operación continua. . 53

4.7.1. Septup experimental para la caracterización de la sensibilidad del fotodiodo. 54

4.7.2. Sensibilidad del fotodiodo (superior) y tensión de circuito abierto (inferior) en función de la iluminación. 54

Lista de abreviaturas

AER	<i>Address Event Representation</i>
APS	<i>Active Pixel Sensor</i>
DNW	<i>Deep N-Well</i>
DVS	<i>Dynamic Vision Sensor</i>
FD	<i>Focal Distance - Distancia Focal</i>
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i>
FPS	<i>Frames per Second</i>
FOV	<i>Field of View - Campo de Visión</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
RMSE	<i>Error Cuadrático Medio</i>
ROI	<i>Region of Interest - Región de Interés</i>
TFS	<i>Time-to-First-Spike</i>
UMC	<i>United Microelectronics Corporation</i>

Capítulo 1

Introducción y motivación

Debido al abaratamiento significativo de los costes de fabricación y puesta en órbita de los sistemas de navegación espacial en los últimos años, se ha acelerado el desarrollo de satélites de dimensiones reducidas (micro, nano y pico-satélites) por parte de empresas aeronáuticas, tecnológicas e instituciones de investigación [1, 2, 3]. Por ejemplo, según un informe de la Agencia Euroconsult, entre 2018 y 2028 se estima que serán lanzados más de 7.000 satélites al espacio [4].

Los sistemas de determinación de actitud es un subsistema crucial utilizado a bordo de satélites, cohetes de exploración, drones y de los sistemas de navegación espacial, en general. Su propósito es medir la orientación del objeto espacial respecto a un sistema de referencia inercial, lo que permite al sistema de control de actitud ajustar y alinear la nave espacial o instrumentos específicos con el vector de orientación deseado [5, 6, 7, 8].

En el mercado existen una gran variedad de sensores disponibles para la determinación de actitud, entre ellos destacan los giróscopos, los cuales perciben la rotación tridimensional sin observar objetos externos, pero las medidas se ven afectadas por la inercia y el ruido [9]. Los sensores de horizonte terrestre son un instrumento que se encarga de medir la radiación infrarroja de la superficie terrestre, proporcionando la orientación del satélite relativa a la Tierra, aunque su aplicación está limitada a órbitas circulares [10]. Por su parte, los magnetómetros detectan la intensidad y dirección del campo magnético en una dirección y se compara con un mapa del campo magnético terrestre; sin embargo, necesita tres dispositivos para la orientación de las naves espaciales y la medición está influenciada en gran medida por las interferencias de la actividad de las propias naves [11]. Por último, los sensores solares, o también conocidos como seguidor solar, utilizan el Sol como referencia para la orientación de las naves espaciales; objeto de estudio de este trabajo [1, 2, 12, 13, 14]. Los sensores solares destacan entre todos ellos por su estructura simple, bajo coste y disminuido consumo de energía.

Por otro lado, además de la determinación de actitud, los sensores solares están orientados para diversas aplicaciones como puede ser el control de la orientación de helióstatos y celdas solares, siendo necesarios dispositivos precisos, exactos y fiables, pero que no requieren una operación rápida. En cambio, los sensores solares orientados a la determinación de actitud de los sistemas de navegación espacial, deben tener un tiempo de respuesta bajo, un reducido consumo de energía, poco peso, dimensiones reducidas, tolerantes a las radiaciones espaciales, y además, tienen que satisfacer las especificaciones de funcionamiento como la precisión, la resolución y el campo de visión [1, 5, 6, 15]. Normalmente, los nanosatélites CubeSat (estructura cúbica) disponen de varios sensores solares

en cada cara para garantizar la determinación de actitud.

Los sensores solares se dividen en dos grandes grupos, analógicos y digitales, los cuales se describen a lo largo de este trabajo. En general, los sensores solares comerciales son digitales y están compuestos por un sensor de imagen constituido por una matriz de píxeles encargada del sensado de la iluminación. A su vez, esta matriz de píxeles está cubierta por una lámina dedicada de tipo pinhole (con un orificio), y dependiendo de la posición del Sol, se ilumina una región de la matriz. Conociendo la región iluminada se calcula el centroide de ésta y, con ello es posible conocer la posición relativa del Sol respecto del sensor (latitud, azimut) empleando simplemente relaciones trigonométricas sencillas [1, 3]. Uno de los principales inconvenientes de estos sensores es que se leen todos los píxeles de la matriz, incluso si no están iluminados, lo cual resulta información redundante, ralentiza la operación del sensor y conlleva un mayor consumo de energía.

Con el propósito de solucionar estas limitaciones, en el grupo de investigación TIC-179 de la Universidad de Sevilla, han diseñado dos prototipos de sensores solares asíncronos que leen solo los píxeles de la matriz que están iluminados, reduciendo notablemente el flujo de datos que se transmite al exterior, disminuyendo el consumo y simplificando la comunicación y compatibilidad en la operación con otros sensores o actuadores posibles del satélite en el que se integre. El principal objetivo de este trabajo aborda la puesta en marcha y la caracterización experimental de los dos prototipos de sensores solares fabricados en la tecnología UMC180nm.

En lo que sigue, el trabajo se divide en cuatro capítulos: en el primero de ellos, se hace un resumen de las propiedades físicas en las que está basada la unión pn que constituye el elemento principal de sensado de los sensores solares, el fotodiodo; se exponen los diferentes sensores solares que existen dependiendo del método de detección de la orientación solar, donde se recalcan los principales inconvenientes que presentan cada uno de ellos, y finalmente se introduce los sensores de visión asíncronos en los que están basados los dos prototipos de sensores solares que se caracterizan y el protocolo de comunicación utilizado. Por último, una vez introducidos los conceptos de interés, se exponen los diferentes objetivos que se abordan en la realización de este trabajo.

En el capítulo 3, se introduce el sistema que constituyen los sensores solares, se describen sus arquitecturas y el principio de funcionamiento y se detallan la circuitería digital y algoritmos empleados para el cálculo del centroide de la región iluminada. Luego, el capítulo 4 se centra en la presentación de los resultados obtenidos tras la caracterización experimental de los dos prototipos, así como una comparación de las especificaciones frente a otros sensores destacados. Por último, en el capítulo 5 se encuentran las conclusiones obtenidas tras la realización del trabajo y se enumeran diferentes líneas futuras posibles.

Capítulo 2

Revisión del arte

El corazón de los sensores de imagen es una matriz de píxeles bidimensional, puesto que constituyen el área de sensado, y la calidad de la imagen está influenciada en gran medida por el rendimiento de los propios píxeles. A su vez, cada píxel contiene un fotodiodo y diversos transistores con funcionalidades diversas dependiendo del diseño. Por su parte, los fotodiodos se forman mediante la unión de dos materiales semiconductores con diferentes concentraciones de átomos de impurezas. Por tanto, en la siguiente sección se realiza un resumen de las propiedades básicas de los semiconductores y cómo es posible conseguir un fotodetector.

Durante el capítulo presente también se describen en qué consisten los sensores solares, su clasificación, así como las ventajas de emplear sensores asíncronos frente a los síncronos, y cual es el protocolo de comunicación apropiado para ello. Por último, se plantean los objetivos del TFM, que buscan una caracterización experimental rigurosa de dos nuevos prototipos de sensores solares desarrollados en el grupo de investigación TIC-179.

2.1. Física de semiconductores

La disposición espacial de los átomos dentro de un material desempeña un papel crucial en la determinación de las propiedades específicas del material, ya que se pueden clasificar las sustancias sólidas presentes en la naturaleza, según el patrón de regularidad que forman los átomos que lo constituyen [16, 17, 18].

Existen tres grandes categorías en la clasificación; la primera de ellas son los sólidos amorfos, donde no existe ningún patrón reconocible de largo alcance en la disposición de los átomos dentro del material (en cualquier sección de la estructura la disposición de los átomos es totalmente diferente a cualquier otra sección). En segundo lugar se encuentran los sólidos cristalinos, los cuales tienen propiedades contrarias a los amorfos, es decir, los átomos están dispuestos en un conjunto tridimensional ordenado. Por tanto, en esta última categoría, es posible reproducir la disposición atómica del material simplemente conociendo una sección de él, ya que presentan un patrón regular que se repite a lo largo del espacio. La última categoría destacada son los sólidos policristalinos, que se encuentran en un nivel intermedio entre los otros dos tipos de materiales. En los materiales policristalinos existen secciones cristalinas mal orientadas entre sí, pero cada uno de estos cristales presenta su propia disposición regular de los átomos dentro del material.

Los materiales semiconductores, de interés particular en el mundo de la electrónica,

están dentro del grupo de los sólidos cristalinos. De modo que, para comprender las propiedades físicas y ópticas, se emplea el modelo de bandas de energía, puesto que otra de las clasificaciones de los materiales existentes es según al nivel de llenado de los estados energéticos accesibles para los electrones que constituyen la red cristalina.

De acuerdo con la mecánica cuántica, los electrones de los átomos se mueven alrededor del núcleo con diferentes valores discretos de energía, denominados orbitales o niveles atómicos, cuyo valor de energía depende de los diversos números cuánticos existentes. En el estado fundamental, que se corresponde con el estado de mínima energía, los electrones del átomo se distribuyen llenando los niveles más bajos de energía según el principio de exclusión de Pauli. Esta regla de la mecánica cuántica establece que en cada estado cuántico no puede coexistir más de un electrón (dos electrones no pueden tener los cuatro números cuánticos idénticos), que debido a que la multiplicidad del espín es dos, en cada nivel energético es posible encontrar como máximo dos electrones (espines con polaridad opuestas).

Asimismo, como los sólidos cristalinos están formados por numerosos átomos unidos entre sí, la interacción de los electrones de enlace (electrones de las capas más externas del átomo) con el potencial eléctrico de los dos núcleos conlleva a un desdoblamiento de los niveles de energía originales de los electrones, dando lugar a un total de N subniveles (siendo N el número de átomos del sólido). Como consecuencia, se tiene una continuidad en energía, pudiendo asignar este concepto a bandas de energía. Las bandas de energía de interés para el estudio de las propiedades eléctricas de los materiales son las denominadas banda de valencia y banda de conducción. La primera de éstas se corresponde con los intervalos de energía más altos que se encuentran ocupados por los electrones en el cero absoluto. En cambio, la banda de conducción es la capa accesible por los electrones de valencia cuando adquieren la energía suficiente para pasar a dichos niveles energéticos sin ocupar. Entre estas dos bandas existe una banda prohibida (gap de energía), donde no existen niveles energéticos accesibles para los electrones de enlace. Gracias a fenómenos

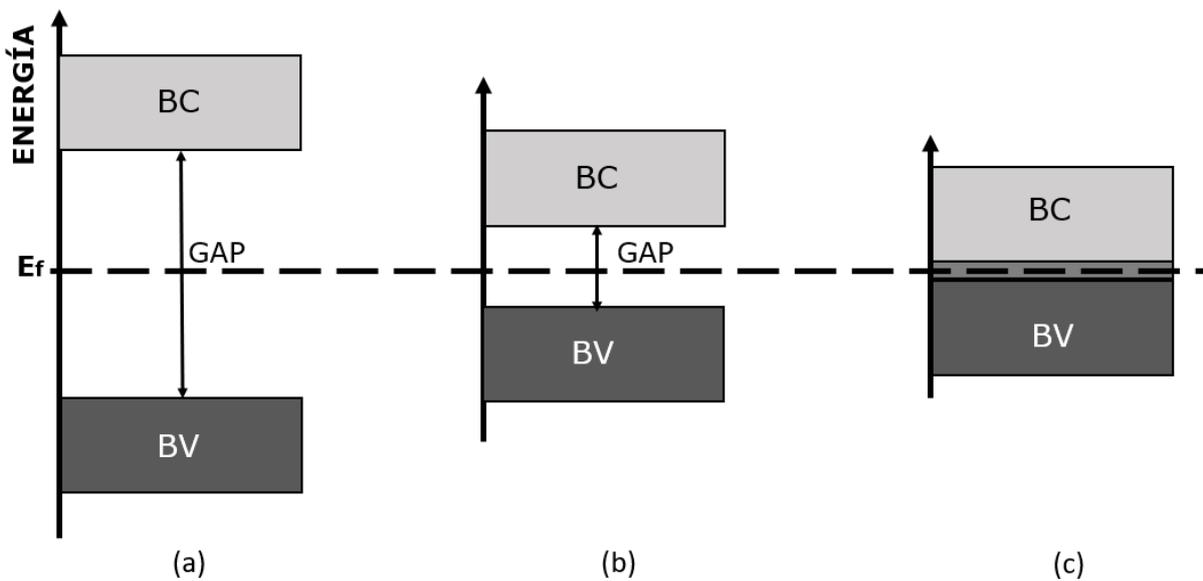


Figura 2.1.1: Estructura de bandas de energía en materiales de tipo (a) aislante, (b) semiconductor, y (c) metal. E_f es la energía de Fermi, mientras que BC y BV hacen referencia a la banda de conducción y de valencia, respectivamente.

de carácter cuántico, los electrones de valencia (a una temperatura superior a 0 K) tienen la posibilidad de superar el gap energético y ocupar un orbital de la banda de conducción; quedando un nivel atómico vacío en la banda de valencia, que es lo que se denomina hueco.

El resultado interesante es que dependiendo del estado de llenado de los niveles energéticos y del ancho del gap de la banda prohibida de los sólidos cristalinos, es posible clasificarlos en tres grandes grupos, tal y como se muestra en la Figura 2.1.1 las respectivas estructuras de bandas de energía .

El primero de ellos (Figura 2.1.1a) es un material aislante, se distingue porque la banda de valencia y la de conducción están separadas por un ancho de varios eV, lo que significa que a temperatura ambiente la banda de conducción se encuentra prácticamente vacío, mientras que la de valencia está al completo. En segundo lugar se encuentran los metales, que tal y como se observa en la Figura 2.1.1c, la banda de conducción solapa en energía con la banda de valencia, y como consecuencia, no existe banda prohibida. Por último, los materiales semiconductores presentan un gap de alrededor de 1 eV, o incluso menor, lo que permite que los electrones adquiriendo al menos dicha energía pasen a ocupar la banda de conducción; el diagrama de bandas de energía correspondiente se muestra en la Figura 2.1.1b.

2.1.1. La unión PN

Los semiconductores intrínsecos, aquellos cristales que no presentan impurezas y tienen la misma concentración de huecos y electrones, poseen propiedades atractivas cuando se dopan de forma controlada con una cierta proporción de átomos de otras sustancias, ya sean donadoras (la estructura adquiere un electrón más) o con sustancias aceptoras (el sólido contiene un hueco más/un electrón menos); constituyendo lo que se denomina un semiconductor extrínseco. Si el semiconductor presenta impurezas donadoras, resulta un semiconductor de tipo N, ya que contiene una concentración de electrones que de huecos. Por el contrario, si el semiconductor tiene impurezas aceptoras, se denomina semiconductor de tipo P, puesto que la concentración de huecos es mayor a la de electrones [16, 17, 18].

Cuando un semiconductor de tipo N y un semiconductor de tipo P se unen de manera abrupta, da lugar a una unión p-n, denominada comúnmente diodo. Como los dos sólidos cristalinos tienen concentraciones de portadores de carga (electrones/huecos) distintas,

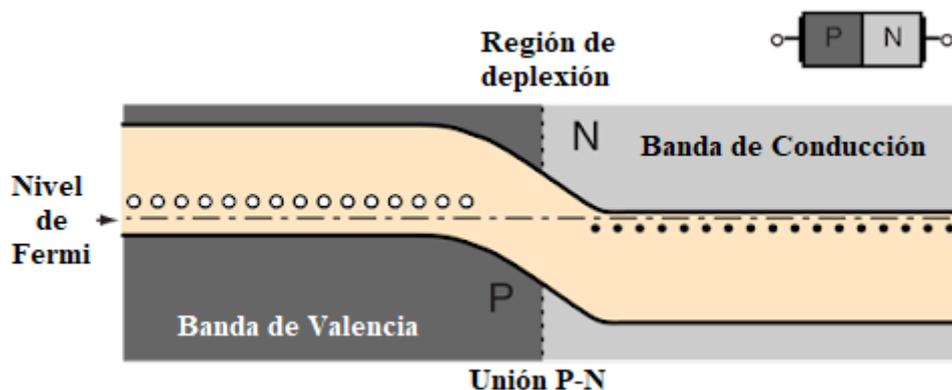


Figura 2.1.2: Diagrama de bandas de energía de la unión PN en equilibrio.

se generan corrientes por difusión que tienden a equilibrar la carga total del dispositivo, desplazándose los portadores hacia la región donde son minoritarios. Como consecuencia del movimiento de las cargas, se crea un campo eléctrico por acumulación de portadores a ambos lados de la unión PN, de modo que se opone a la difusión hasta que la corriente de arrastre se iguala a la corriente de difusión. Este fenómeno genera una región espacial libre de portadores, denominada región de depleción. En la Figura 2.1.2 se muestra el diagrama de bandas de energía de la unión PN en equilibrio, donde se observa la curvatura que presentan los niveles energético debido a la unión de los dos semiconductores.

Cuando se polariza el diodo en directa, es decir, la tensión del terminal tipo P es mayor que la del tipo N, el flujo difusivo domina frente al arrastre y las bandas de conducción se acercan. Esto da lugar a la existencia de un gradiente de portadores desde la región donde son mayoritarios hacia la que son minoritarios, creándose un flujo de corriente a través del dispositivo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que para que el diodo se comporte como un conductor es necesario que la tensión de polarización esté por encima de la tensión umbral, V_{th} . Tensión a partir de la cual comienza a circular corriente, la cual crece de forma exponencial en dicha región de operación, como se muestra en la Figura 2.1.3b.

En cambio, si la unión PN se polariza en inversa, es decir, el potencial del terminal tipo P es menor que el de tipo N, los flujos de arrastre crecen y dominan a la difusión. Como consecuencia, se produce un flujo de portadores de carga desde la zona en la que son minoritarios hacia las regiones en las que son mayoritarios. Con lo cual, esto provoca una corriente a través del dispositivo muy débil, que idealmente se puede considerar nula. En la Figura 2.1.3 se muestra la curva I-V característica de la unión PN polarizada, junto con el símbolo del diodo.

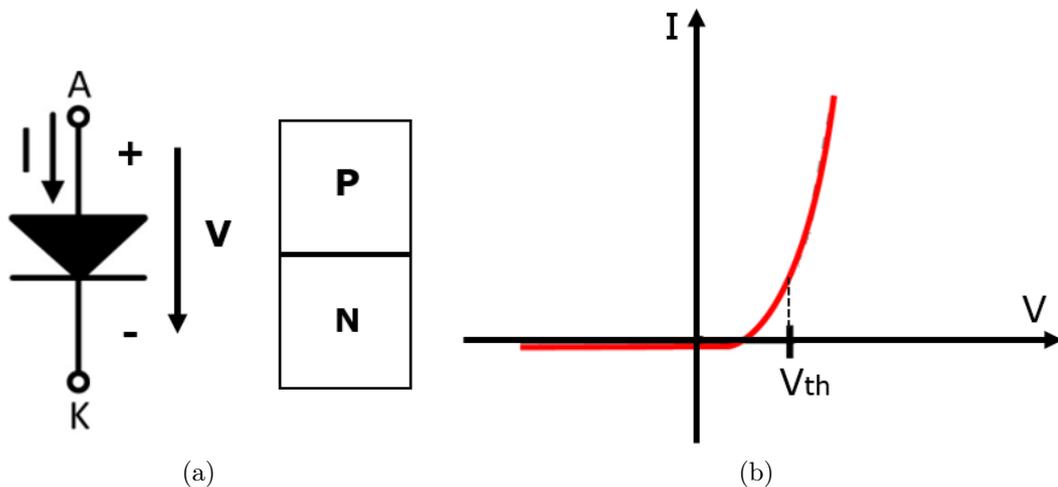


Figura 2.1.3: (a) Símbolo de la unión PN, diodo. K y A hacen referencia al cátodo y ánodo, respectivamente. (b) Curva I-V característica de la unión PN polarizada.

2.1.2. Diodos bajo iluminación

Los diodos son el elemento principal de los sensores de imagen, puesto que son capaces de detectar los fotones que impactan sobre la matriz de píxeles (formada por un conjunto

de fotodiodos, es decir, uniones pn), absorben su energía y la transforman en corriente eléctrica. Este fenómeno se conoce como efecto fotoeléctrico [16, 17, 19, 20].

La corriente eléctrica en un semiconductor se produce debido a la promoción de los electrones de la banda de valencia a la de conducción. Cuando un fotón con una energía suficiente es absorbido por el material semiconductor (atraviesa la zona de carga espacial de la unión PN), se genera un par electrón-hueco que al moverse impulsados por el campo eléctrico de la unión origina una corriente eléctrica. Sin embargo, no todos los fotones son capaces de lograr este efecto, ya que solo lo consiguen aquellos que poseen una energía E_{ph} superior al gap energético del semiconductor. Por tanto, existen limitaciones de detección de diferentes longitudes de onda dependiendo del material [17, 20].

La energía del fotón viene dada por la expresión (2.1.1), donde h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz en el vacío, λ la longitud de onda del fotón, y ν la frecuencia [16, 20].

$$E_{ph} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \nu \cdot h \quad (2.1.1)$$

Obsérvese que, por ejemplo, para el silicio (semiconductor más empleado en la fabricación de dispositivos electrónicos) que posee un ancho de la banda prohibida de aproximadamente $1,12 \text{ eV}$, no es capaz de detectar fotones con cualquier longitud de onda del espectro electromagnético, ya que la energía E_{ph} es inversamente proporcional a λ . En concreto, el silicio puede captar la luz dentro del espectro visible y del infrarrojo cercano; sirviendo por tanto para el sensado de la luz solar.

Cabe resaltar que, los pares electrón-hueco que son generados gracias a la absorción de fotones normalmente tienden a recombinarse, excepto cuando la radiación penetra en la zona de deplexión. En esta región existe un campo eléctrico que expulsa los huecos y electrones que entran en la región, generando una corriente en la misma dirección que el campo eléctrico, resultando una corriente en inversa que es conocida como fotocorriente. Esta corriente puede controlarse mediante la iluminación del fotodiodo, puesto que a medida que aumenta la intensidad de la luz incidente, o, lo que es lo mismo, la tasa de

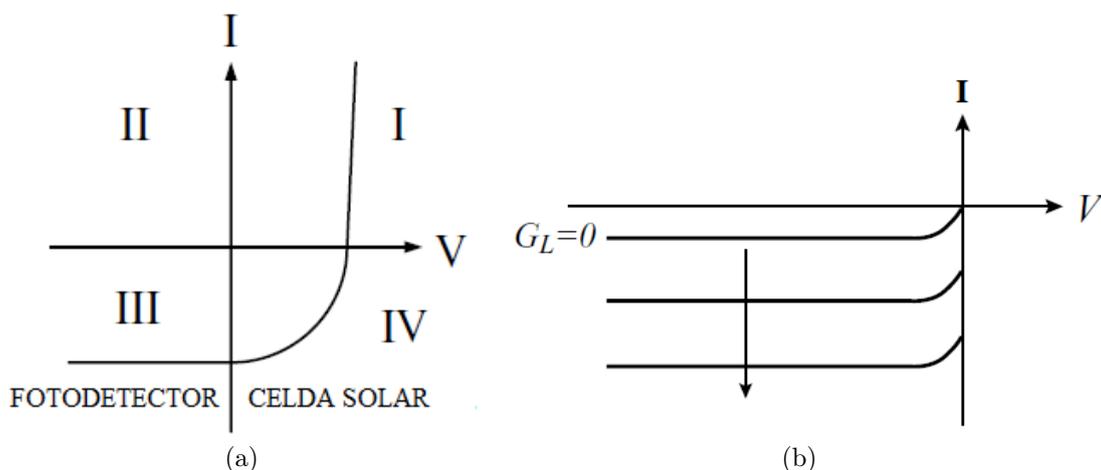


Figura 2.1.4: (a) Representación I-V mostrando los regímenes de operación de un diodo bajo iluminación. Cuando opera en el tercer cuadrante, el dispositivo actúa como un fotodetector, mientras que en el cuarto cuadrante se comporta como una celda solar. (b) La corriente de polarización inversa aumenta a medida que la intensidad de la luz se incrementa. $G_L = 0$ portadores/segundo indica ausencia de iluminación.

generación de pares electrón-hueco, la corriente inversa se acentúa (es proporcional al flujo incidente de fotones); como se muestra esquemáticamente en el tercer cuadrante de la Figura 2.1.4. Nótese que el plano I-V del diodo está diferenciado en cuatro cuadrantes. Además, falta mencionar que el control y la monitorización de la fotocorriente constituye la base de un gran número de dispositivos, incluyendo los fotodetectores [17, 19].

Cuando el diodo está operando en el tercer cuadrante del plano I-V, el dispositivo disipa energía, ya que tanto la corriente como la tensión tienen signo negativo. En cambio, si a la unión PN se le aplica una tensión positiva al mismo tiempo que está incidiendo la radiación sobre el dispositivo, se obtiene el comportamiento I-V ilustrado en el cuarto cuadrante de la Figura 2.1.4a, que se corresponde con la de una celda solar. En este caso, la corriente y la tensión presentan signos contrarios, lo que significa que en esta región de operación la unión no está consumiendo energía, sino que actúa como una fuente de energía.

En la siguiente sección, se estudia más detalladamente el comportamiento del diodo operando como celda solar, puesto que los prototipos de sensores solares que se caracterizan en este trabajo están basados en ese principio de funcionamiento.

2.1.3. Diodos como celdas solares

Las celdas solares aprovechan la energía captada por la radiación solar para generar una corriente eléctrica. Con el fin de estudiar el comportamiento del diodo operando en la región fotovoltaica, se emplea el modelo cuyo circuito equivalente se muestra en la Figura 2.1.5c [17, 21]. En paralelo con el diodo se encuentra una capacidad C_l que modela todas las capacidades conectadas en paralelo con el diodo.

La característica de la corriente que circula por el dispositivo se analiza mejor si se considera que es siempre la suma de las corrientes directa e inversa. Las corrientes involucradas en la operación son la fotocorriente generada por los pares electrones-huecos originados en la zona de depleción, I_{ph} , y por otro lado, la corriente que fluye por el diodo en ausencia de iluminación, I_d . Con lo cual, la corriente efectiva neta, I_{pd} , viene dada por (2.1.2) [17, 21].

$$I_{pd} = I_{ph} + I_d = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{eV}{nk_B T} \right) - 1 \right] \quad (2.1.2)$$

Como resultado se tiene que, la tensión en directa aumenta las corrientes de difusión de forma exponencial según la ley del diodo, mientras que la corriente inversa se mantiene constante. Cuando el diodo se encuentra en ausencia de polarización y está sometido a un flujo de fotones, la corriente neta no es nula, ya que existe una corriente inversa transportada principalmente por los portadores fotogenerados, la cual se denomina corriente de cortocircuito, I_{sc} .

Otro parámetro de especial interés es la tensión de circuito abierto, V_{oc} , que se corresponde con la tensión a la cual la corriente total que circula por el dispositivo es nula, es decir, cuando la corriente directa se iguala a la fotogenerada, $I_{pd} = 0$. Su valor está dado por la expresión (2.1.3) [17, 21]. Nótese que depende de la tasa de generación de pares electrón-hueco (iluminación) y de la corriente inversa de saturación (I_s), que a su vez es función de la temperatura, y , de las dimensiones y perfiles de dopado de la unión PN.

$$V_{oc} = n \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (2.1.3)$$

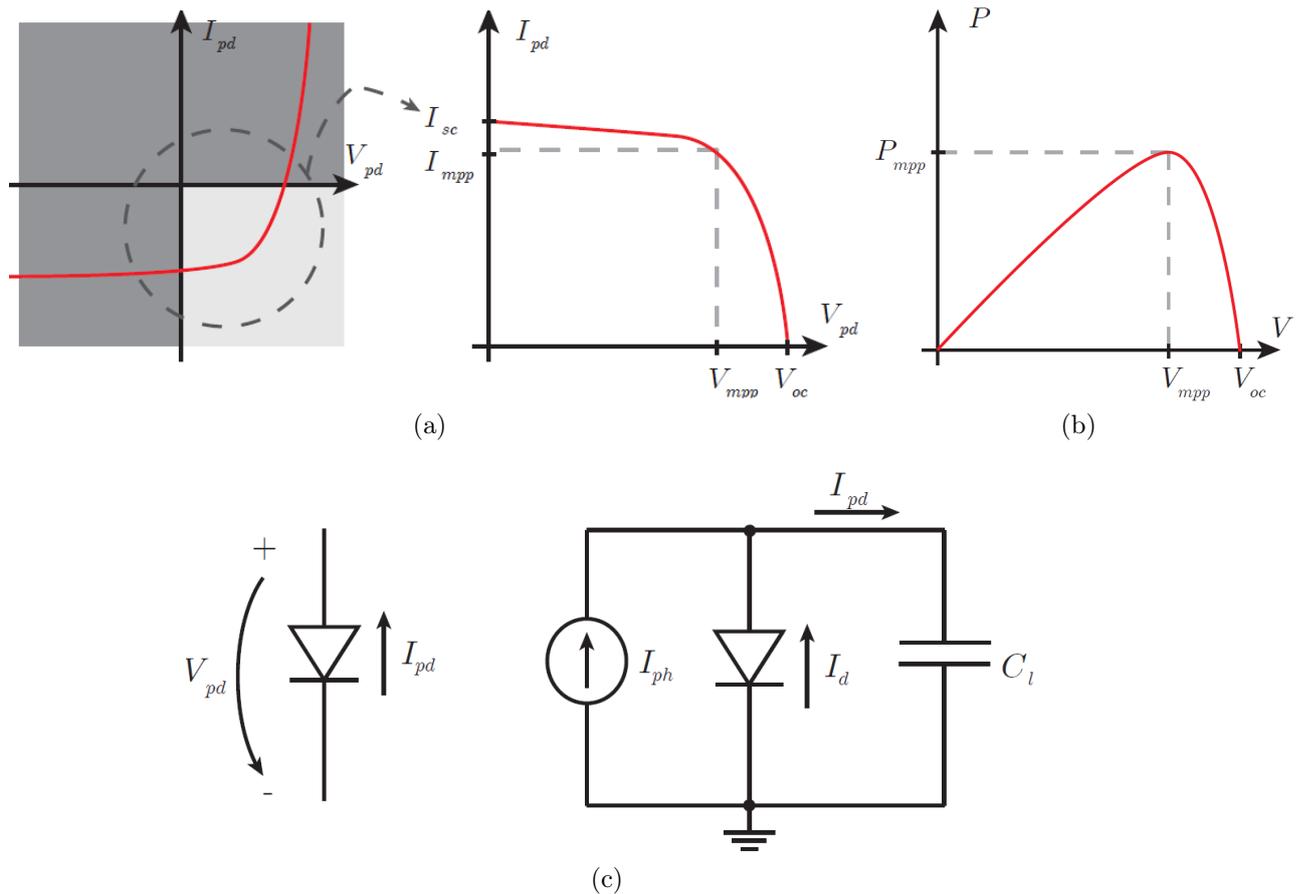


Figura 2.1.5: (a) Representación del cuadrante de la característica I-V del diodo tomando la corriente en sentido contrario. (b) Curva P-V. El punto de operación óptimo (I_{mpp} , V_{mpp}) proporciona la máxima energía que puede ser almacenada. (c) Modelo del circuito para un diodo operando como celda solar.

Para ilustrar gráficamente los parámetros de interés que caracterizan a las celdas solares, normalmente se representa el cuarto cuadrante de la característica I-V del diodo tomando la corriente en sentido contrario, como se muestra en la Figura 2.1.5a. Obsérvese que la tensión V_{oc} se asocia a la máxima tensión que puede almacenarse en una batería conectada en paralelo con el diodo, mientras que I_{sc} es la máxima corriente que puede obtenerse de la celda fotovoltaica.

Por otro lado, la máxima potencia de un celda solar se consigue alcanzando el máximo producto posible de tensión y corriente en el cuarto cuadrante de la característica I-V. En las curvas de las Figuras 2.1.5a y b existe un punto donde la potencia es máxima, a la cual le corresponde una tensión V_{mpp} y una corriente I_{mpp} . Los valores de la tensión V_{oc} son reducidos, normalmente fluctúan entre 0,2 y 0,5 V en condiciones de iluminación estándar.

Una vez explicado el concepto de celda solar, que es principio básico de funcionamiento de los fotodiodos que constituyen la matriz de píxeles de los sensores solares del presente trabajo, en los siguientes apartados se exponen los diferentes tipos de sensores solares clásicos y cuales son las ventajas de los prototipos diseñados en el grupo de investigación TIC-179 frente a éstos.

2.2. Sensores solares

Actualmente, es complicado encontrar algún sistema de navegación espacial (nave espacial, satélite, sondas espaciales, etc) que no utilicen sensores solares para determinación de actitud. Los sensores solares son dispositivos que determinan la posición relativa del Sol (*latitud*, θ , *azimut*, ϕ) referida a su centroide, es decir, emplean la estrella más brillante del firmamento como referencia (Figura 2.2.1). Asimismo, el Sol tiene una luminosidad que no se ve afectada por otro planeta o estrella brillante, y su radio angular reducido permite que se mantenga constante para cualquier satélite que orbite la Tierra [5, 6, 7, 15].

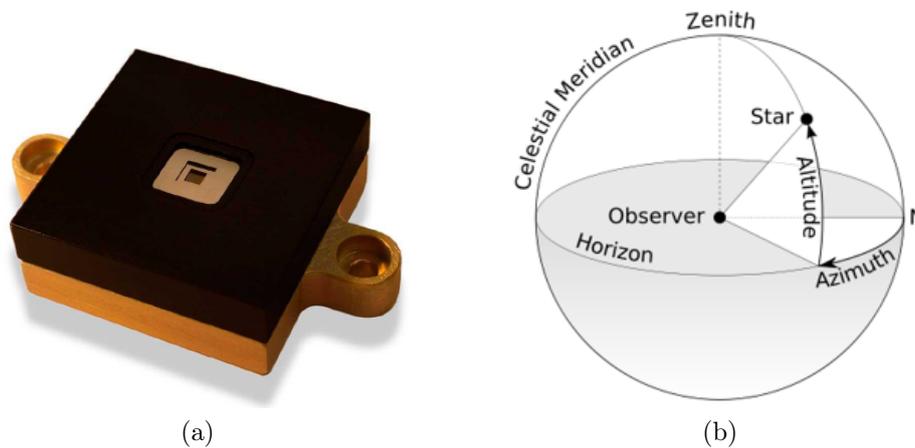


Figura 2.2.1: (a) Sensor solar digital de dos ejes. (b) Esquema representativo de los ángulos que determinan la posición relativa del Sol (*latitud*, *azimut*).

Los sensores solares principalmente se pueden dividir en dos grandes categorías en función de su método de detección de orientación: analógicos [23, 24] y digitales [1, 2, 13]. Los primeros de ellos, no necesitan ningún hardware adicional en la nave espacial para la detección de actitud, y por tanto, son muy atractivos para aplicaciones de bajo coste. Sin embargo, es muy sensible al efecto albedo (luz solar reflejada por la superficie terrestre o marina que ilumina el sensor solar) y para paliar este inconveniente es necesario tener a bordo un ordenador a fin de implementar un cálculo de corrección adicional. Por el contrario, los sensores digitales presentan mayor resolución y son inmunes al efecto albedo, puesto que como la intensidad de la luz por el efecto albedo es bastante inferior a la luz solar puede descartarse en el cómputo de la actitud [2, 22]. Cada uno de estos grupos de sensores se describen en las siguientes secciones, destacando los principales inconvenientes que presentan.

Aunque son diversas las aplicaciones que presentan los sensores solares, como puede ser la recolección de energía solar, o el control de la posición de las celdas solares o heliostatos, los prototipos de sensores solares caracterizados en este trabajo están orientados para el control de actitud de navegación espacial.

2.2.1. Sensor solar analógico

Un sensor solar analógico está compuesto por un par de fotodiodos fabricados en el mismo sustrato de silicio cristalino y dispuestos ortogonalmente para poder medir los dos

ángulos del vector solar en ambas direcciones, tal y como se muestra en la Figura 2.2.2 [23, 24]. El dispositivo integra en el chip una cubierta de vidrio con un orificio a través del cual deja pasar los rayos solares, iluminando parcialmente el área de los dos fotodiodos (A_1 y A_2).

La radiación solar incidente genera una fotocorriente en cada fotodiodo, que es proporcional a la irradiancia proyectada en el plano del sensor y al área iluminada. Dicho área depende del ángulo de la luz en el vidrio, que difiere del ángulo incidente debido a la refracción en la interfaz vidrio-aire. Finalmente, se mide el ángulo de incidencia mediante el cociente de las corrientes generadas en el área iluminada de cada fotodiodo.

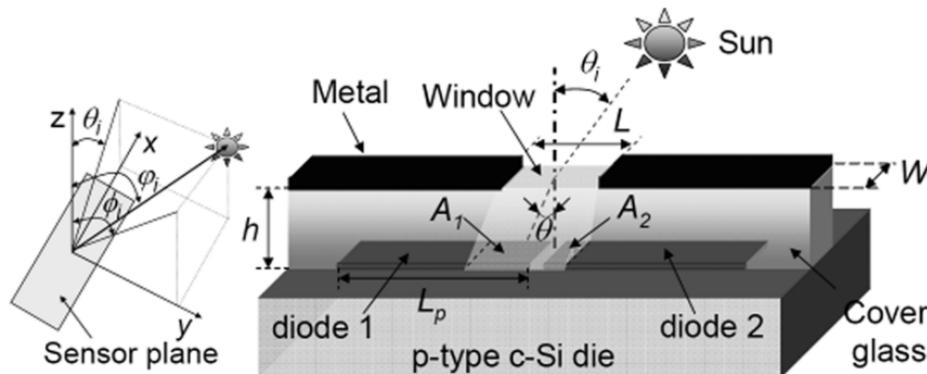


Figura 2.2.2: Esquema simplificado de un sensor solar analógico que consta de dos fotodiodos para medir un ángulo de incidencia.

Aunque los sensores solares analógicos se distinguen por su simplicidad y su rápida operación, estos dispositivos son muy sensibles a la iluminación del medio ambiente, propensos a *mismatch* y presentan poca precisión. Además, normalmente es necesario incluir varias etapas amplificadoras como consecuencia de las señales débiles que son emitidas por los fotodiodos, e incluyendo que no son suficientemente precisos para grandes desviaciones de la dirección del Sol del eje óptico del sensor solar.

2.2.2. Sensor solar digital

La arquitectura completa que constituye un sensor solar digital convencional se muestra en la Figura 2.2.3a. El sensor está compuesto por un conjunto de fotodiodos, píxeles que constituyen los elementos de sensado, dispuestos en una matriz de dos dimensiones, como se ilustra en la Figura 2.2.3b. Además, en la periferia del dispositivo se encuentra un bloque encargado del control y la lectura de dicha matriz de píxeles [2, 14].

Normalmente, se emplean píxeles de tipo APS (*Active Pixel Sensor*) y sensores de imagen basados en frames con una óptica dedicada, típicamente de tipo *pinhole* y una cubierta. Un frame es una matriz de píxeles bidimensional en la que cada píxel almacena información relacionada con los niveles de luminosidad en la región que se encuentra dicho elemento. Dependiendo de la posición del Sol, una pequeña fracción de los píxeles de la matriz se iluminan. Luego, se leen de forma secuencial y síncrona, por la circuitería de la periferia encargada, los valores de iluminación de todos los píxeles de la matriz. A su vez, mediante un algoritmo se determina el centroide de la región iluminada, denotada como Región de Interés (ROI, *Region-of-Interest*) en la Figura 2.2.3b, y finalmente empleando expresiones trigonométricas sencillas se calcula la posición relativa del sensor [1, 15].

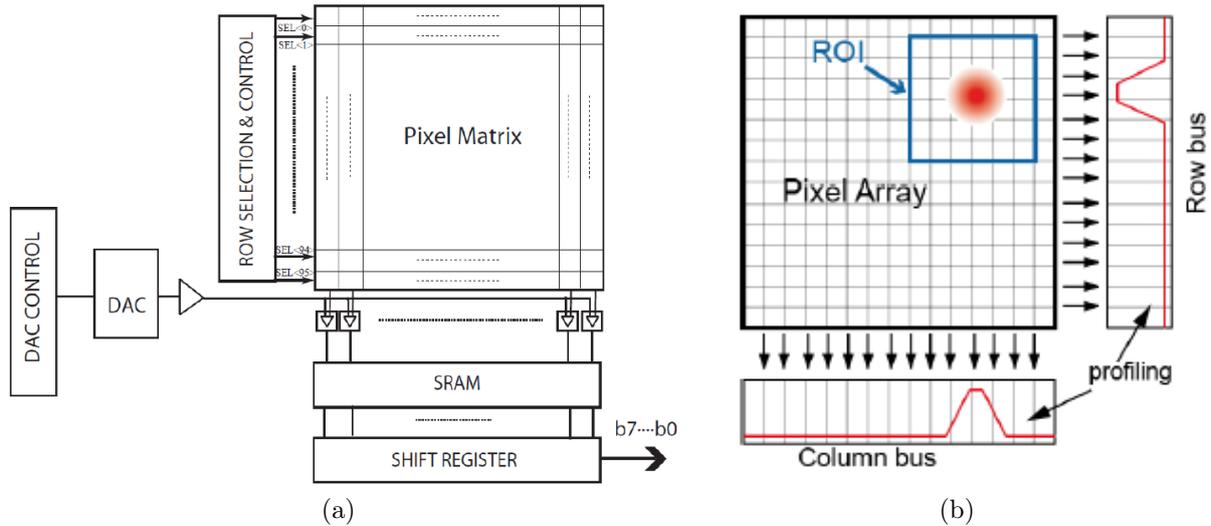


Figura 2.2.3: (a) Arquitectura de un sensor solar convencional. (b) Esquema de lectura de la matriz de píxeles. Se encuentra recuadrada la Región de Interés (ROI), que se corresponde con la zona de píxeles iluminados.

A diferencia de los sensores analógicos clásicos [23, 24], los sensores solares digitales son fiables y robustos a las perturbaciones de las fuentes de luz externas. Además, incluso los sensores de imagen convencionales se pueden adaptar para operar como sensor solar. Sin embargo, estos dispositivos presentan ciertas limitaciones como es su alto consumo de energía, puesto que hay que escanear periódicamente toda la matriz de píxeles cada vez que la región de interés cambie de posición, o, lo que es lo mismo, cada vez que el Sol cambie su orientación respecto al sensor. Otro inconveniente es que el tiempo de exposición tiene que adaptarse en función de las condiciones de iluminación, y además, es necesario predefinir el tiempo de integración, que se define como el tiempo durante el cual el fotodiodo del píxel convierte la luz incidente en una corriente fotogenerada.

Es importante resaltar que, los píxeles que constituyen a un sensor solar digital convencional transmiten la información a la periferia de forma síncrona, es decir, ante cualquier cambio de la escena visual se procesan incluso los píxeles no iluminados (no constituyen la ROI), que no aportan ningún tipo de información para el cómputo del centroide de la región iluminada. Como consecuencia, aumenta el tiempo de operación, la latencia y el consumo de ancho de banda y energía debido a los píxeles oscuros.

Ya que idealmente solo deben ser leídos los píxeles iluminados que forman la región de interés, surgen los sensores solares asíncronos [1, 3], para solucionar las limitaciones mencionadas, en los que solo los píxeles iluminados mandan información de forma asíncrona al exterior; reduciendo notablemente la latencia y el consumo de energía.

2.2.3. Sensores de visión asíncronos

Los sensores de imagen asíncronos surgen de la idea de intentar imitar, empleando un dispositivo electrónico, el funcionamiento de la retina humana, la cual es capaz de extraer y enviar la información relevante al cerebro ante diferentes condiciones de iluminación de una escena visual. La retina está constituida por muchas células especializadas interconectadas en estructuras tridimensionales y su capa superior está formada por fotorreceptores que

transforman la luz entrante en trenes de pulsos sinápticos [25].

El primer modelo que aproxima el comportamiento de la retina humana fue construido con componentes discretos por Fukushima en 1970 [27]. Más tarde, en 1994, Mahowald diseñó el primer sensor de visión bio-inspirado capaz de detectar el espacio temporal dentro de una escena visual modelando el funcionamiento de las células de la retina [25, 26]. Desde entonces, han aparecido varios sistemas de visión biológicos capaces de detectar el contraste espacio-temporal.

Es de especial relevancia mencionar el trabajo de Silvilotti y otros autores [28], puesto que fue una aportación crucial a los sistemas de visión asíncronos. Presentaron un protocolo de comunicación de representación de dirección de eventos (*Address Event Representation, AER*) para intentar imitar la estructura y la codificación de la información del cerebro.

Los sistemas bio-inspirados se pueden dividir en tres grandes categorías: sensores de contraste espacio-temporales, sensores DVS (*Dynamic Vision Sensor*) y los sensores tipo octopus. El primer sensor DVS fue propuesto por Lichsteiner [29] en 2008. Este tipo de sensor es sensible a los contrastes temporales, respondiendo directamente a la dinámica de la escena rápidamente con un bajo consumo de energía y ancho de banda. Por otro lado, los sensores de tipo octopus, quien fue pionero en su diseño Culurciello en 2003 [30], codifican en frecuencia o en ancho de pulso los niveles de iluminación captados por los píxeles, tras un reset global de toda la matriz de píxeles.

En la Figura 2.2.4 se muestra un esquema simplificado de un píxel octopus junto con su principio de operación, propuesto por J.A. Leñero et al. [1, 31]. La capacidad, C en paralelo con el fotodiodo, D_1 , representa la capacidad equivalente en el cátodo del fotodiodo, y I_{ph} la corriente fotogenerada. Inicialmente, se precarga el fotodiodo a la tensión de alimentación, V_{DD} , y luego, la capacidad se empieza a descargar con una

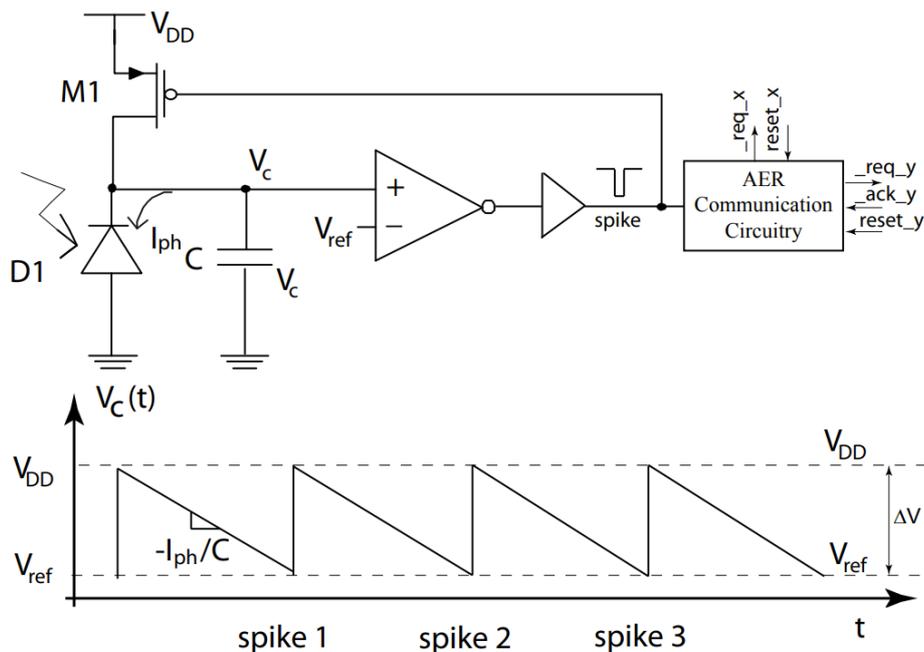


Figura 2.2.4: Diagrama de bloques simplificado de un píxel cuyos pulsos transmitidos son proporcionales a la intensidad de la luminosidad. Cada vez que tiene lugar un pulso, se transmite de forma asíncrona las coordenadas del píxel al exterior del chip.

pendiente proporcional a la fotocorriente del diodo. Cuando la tensión del cátodo del fotodiodo, V_c , alcanza la tensión umbral del comparador, V_{ref} , el comparador resetea el píxel y comienza de nuevo la integración de la carga. Como resultado, se tiene que el tren de pulsos generados presenta una frecuencia que es proporcional al nivel de iluminación, que está dada por la expresión (2.2.1).

$$f \approx \frac{I_{ph}}{C \cdot (V_{DD} - V_{ref})} \quad (2.2.1)$$

Por otro lado, otra de las alternativas son los sensores *Time-to-First-Spike* (TFS), que miden el tiempo desde que se inicia la operación de medición de la iluminación hasta que se produce el pulso. Esta idea surge por el hecho de que está comprobado que la información más relevante la contiene el píxel que dispara primero. En el caso del sensor solar, el píxel más iluminado está muy próximo al centroide de la ROI.

Por último, mencionar que uno de los prototipos de los sensores solares caracterizados en este trabajo es de tipo octopus, pero a diferencia del esquema del píxel de la Figura 2.2.4, el fotodiodo opera como celda solar y el pulso se transmite cuando la tensión del fotodiodo se precarga como consecuencia de la iluminación, a una tensión superior al umbral del comparador. El otro prototipo presenta una especial novedad, ya que contiene una circuitería digital interna encargada del cómputo del centroide de la región iluminada. En el capítulo 3 se describen los diferentes tipos de sensores y el principio de operación de cada uno de ellos.

2.3. Protocolo de comunicación AER

Uno de los principales problemas cuando se intenta integrar e implementar un sistema bio-inspirado es la comunicación entre los diferentes elementos, puesto que no es sencillo distinguir que píxel del sistema ha transmitido un pulso. Los píxeles se consideran como entidades autónomas que generan información (pulsos) de forma independiente que deben transmitirse fuera del chip. Para paliar este problema se emplea el protocolo de comunicación AER (*Address Event Representation*), el cual suple la falta de conectividad punto a punto que presenta la comunicación del cerebro por una multiplexación en el tiempo a muy alta velocidad de un canal compartido que transporta la información [28, 35].

Este protocolo emplea dos elementos que se corresponden con los dispositivos conectados, funcionando como receptor (*receiver*) o como emisor (*sender*), tal y como se ilustra en la Figura 2.3.1. Además, presenta señales de establecimiento de la comunicación, que se corresponden con las señales de petición (*R* o *REQ*) y las señales de aceptación (*A* o

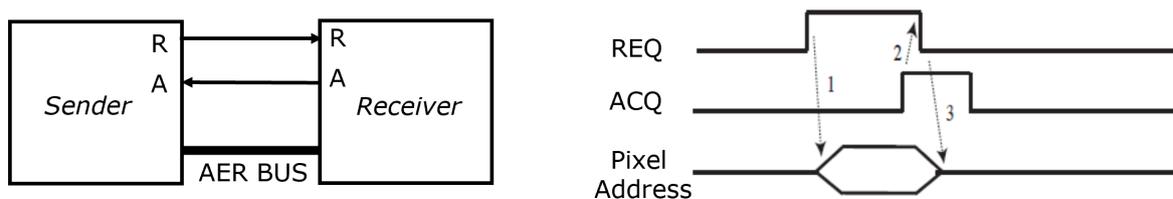


Figura 2.3.1: Líneas de comunicación entre el dispositivo emisor y el receptor, junto con un cronograma de las señales involucradas en el protocolo de comunicación AER. El emisor es la matriz de píxeles y el receptor, el periférico externo que almacena la información.

ACK). Asimismo, existe un bus de direcciones (AER BUS), el cual es compartido y es donde se escribe las coordenadas (x, y) del emisor que ha solicitado acceso a dicho bus. En este trabajo, el emisor es la matriz de píxeles, mientras que el receptor es común y se corresponde con el periférico externo que almacena información (*Field-Programmable Gate Array*, FPGA).

En la Figura 2.3.1 se observa el cronograma de las señales descritas. Cuando uno de los píxeles del sensor de imagen solicita acceso al bus compartido, la señal *REQ* se pone a nivel alto, y las coordenadas del píxel correspondiente le envía sus coordenadas al bus. En este momento, el receptor almacena la dirección de dicho píxel y activa la señal *ACQ* para indicar que ha recibido la información correctamente.

Uno de los principales problemas a los que se enfrentan los sensores de imagen basados en AER es el de las colisiones de las peticiones, ya que el bus de comunicación es compartido con el exterior, y puede ocurrir que dos o más emisores (píxeles) soliciten acceso al bus de direcciones simultáneamente. Para solucionar este inconveniente se emplea el bloque denominado arbitrador, cuyo objetivo es decidir ante las colisiones de peticiones de los píxeles, cual de ellas ha llegado con anterioridad, y quien de ellos debe escribir en el bus de direcciones. El arbitrador presenta dos entradas correspondientes a dos peticiones de píxeles diferentes, req_0 y req_1 , y sus salidas respectivas, ack_0 y ack_1 , como se observa en la Figura 2.3.2a [35]. Como puede ocurrir que más de dos píxeles soliciten el acceso al bus compartido, es necesario emplear varios arbitradores en forma de árbol, tal y como

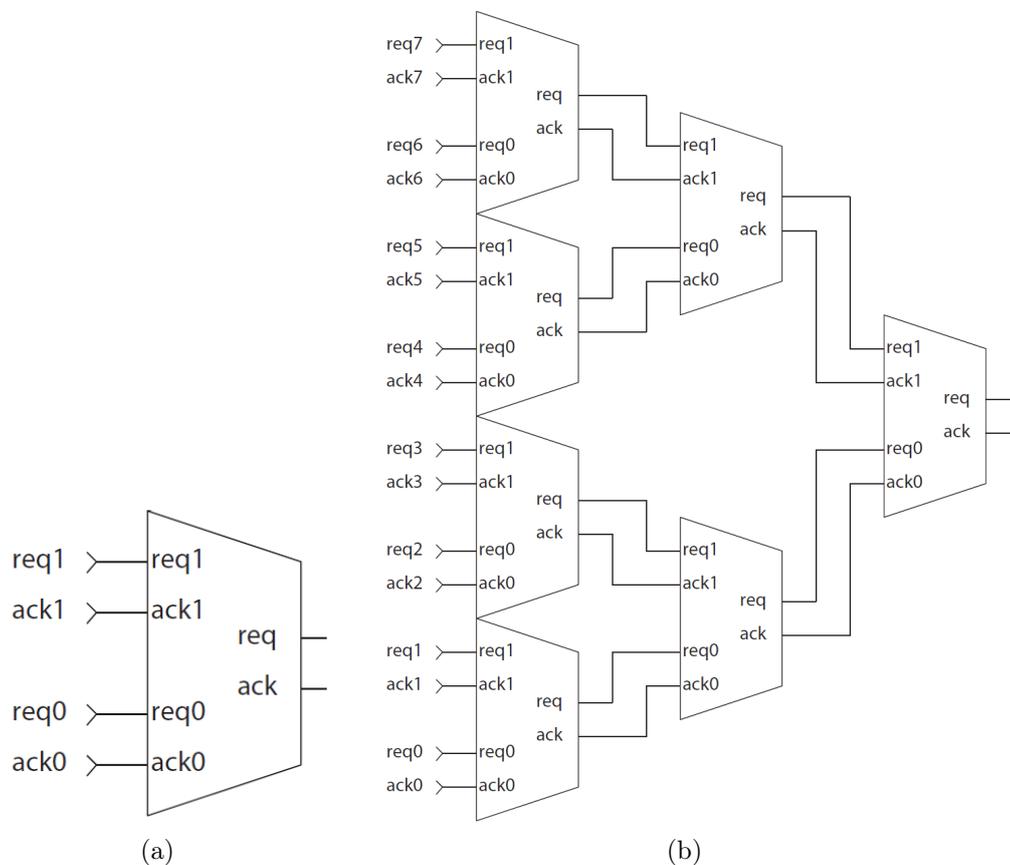


Figura 2.3.2: (a) Bloque básico de un arbitrador. (b) Árbol de siete arbitradores. Las entradas son req_0 y req_1 , y sus salidas respectivas ack_0 y ack_1 .

se muestra en la Figura 2.3.2b [35]. Además, este bloque presenta una señal de salida req para realizar una petición en el siguiente nivel, y una entrada ack para aceptarla, es decir, cada etapa emite una petición propia al siguiente nivel de la estructura de árbol.

En el caso de los sensores solares de este trabajo se ha empleado un arbitrador *greedy* [35], basado en atender todas las peticiones locales antes de devolver el control al nivel superior de la jerarquía, cuyo esquemático para dos entradas se muestra en la Figura 2.3.3. Las dos puertas AND acopladas constituyen un flipflop RS con entradas bajas activas. La salida del flipflop está a nivel alto cuando ninguno de los emisores solicitan acceso al bus, es decir, cuando $req_0 = 0$ y $req_1 = 1$. Por el contrario, el estado en el que el flipflop cae está determinado por cual de las dos peticiones activas, req_0 o req_1 , llega primero. En el caso en el que req_0 llegue con anterioridad, la salida de la puerta NAND inferior estará a nivel bajo, '0', y la señal req se propagará al siguiente nivel del árbol. Si además ese req es concedido por un ack entrante, se establece ack_0 . Cuando el píxel solicitante pone a nivel bajo req_0 , y req_1 está a nivel alto, se le concede al píxel correspondiente el acceso al bus de direcciones. Nótese que la señal req no se libera hasta que no existen más peticiones.

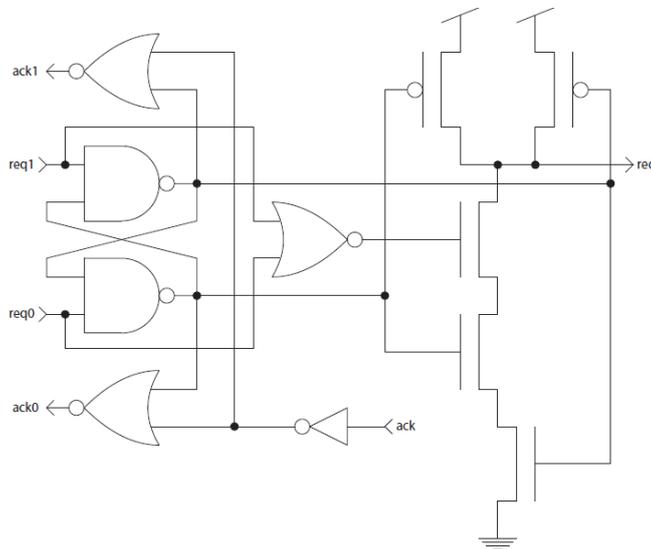


Figura 2.3.3: Arbitrador greedy con dos entradas.

2.4. Objetivos y alcance del trabajo

Una vez introducidos los conceptos básicos en los que están basados los sensores solares y cuales son las características que se pretenden conseguir utilizando los dos prototipos de sensores solares asíncronos, como son alcanzar un ahorro considerable de energía, un reducido flujo de datos a la salida y bajo tiempo operación, se describen a continuación los diferentes objetivos abordados en este trabajo:

- Puesta en marcha de los diferentes experimentos llevados a cabo en el laboratorio de optoelectrónica del Instituto de Microelectrónica de Sevilla para caracterizar los dos prototipos de sensores solares.
- Toma de medidas, análisis y elaboración de informes de los resultados obtenidos tras la caracterización experimental de los dispositivos.

- Comparación de las especificaciones de los prototipos con otros sensores destacados del estado del arte de estos dispositivos.

Capítulo 3

Descripción del sistema

En este capítulo se describe el sistema completo que constituye a los sensores solares, así como la arquitectura de cada respectivo sensor, los modos de operación y cómo es posible calcular el centroide de la región iluminada con el fin de determinar la posición del Sol relativa al sensor.

3.1. Principio de operación del sensor solar

La funcionalidad básica de un sensor solar es el cálculo de la posición instantánea del Sol en el marco de referencia del sensor, es decir, la orientación de la dirección de iluminación en el Campo de Visión (*Field of View, FOV*) del sensor. Esto es posible conseguirlo mediante la obtención de imágenes del Sol y la posterior reconstrucción de los componentes del vector unitario solar en el plano focal del sensor [1, 2, 3, 13].

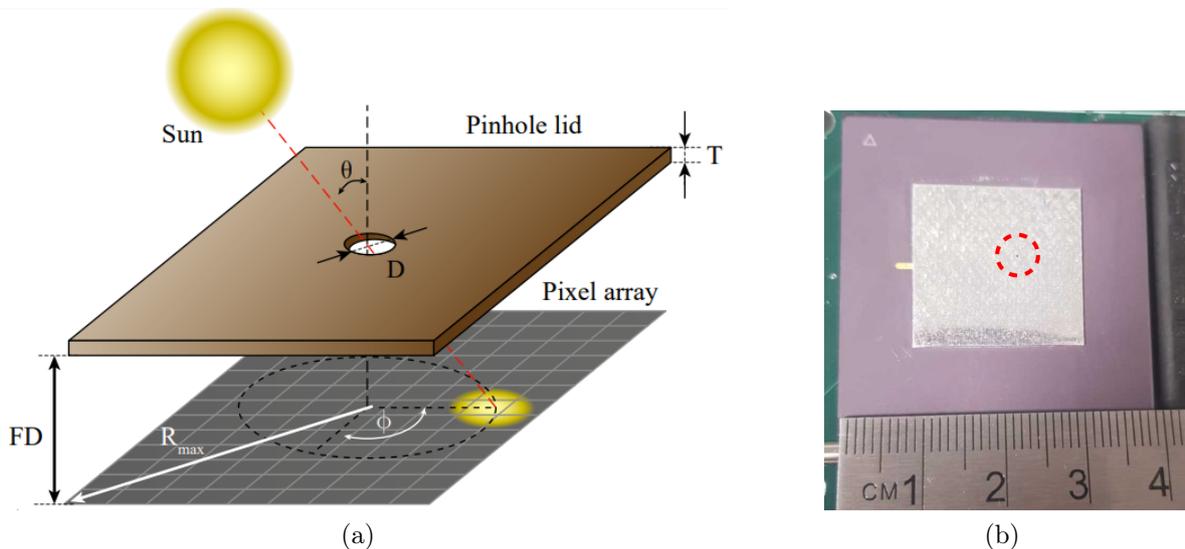


Figura 3.1.1: Implementación del sistema. Existe una cubierta opaca con un orificio que cubre la matriz de píxeles, a través del cual entran los rayos de luz. (a) Esquema de los diferentes parámetros de diseño y los ángulos de interés; (b) el sensor físico junto con la lámina de aluminio

El sistema se implementa físicamente cubriendo la matriz de píxeles del sensor por

una cubierta opaca de tipo *pinhole*, dejando pasar solo un haz de luz sobre el array de fotodiodos. De modo que, solo un número reducido de píxeles se van a iluminar por la luz solar, tal y como se muestra en la Figura 3.1.1a [3]. Dependiendo de la posición del Sol respecto al sensor, la Región de Interés (Region-of-interest - ROI) se localiza en diferentes regiones de la matriz de píxeles. Estos píxeles iluminados pueden leerse mediante una relación entre las salidas (que se explica en la secciones siguientes) que permite calcular la posición de dichos píxeles iluminados. Además, conociendo parámetros como la Distancia Focal (FD, distancia entre la matriz de píxeles y la cubierta/óptica) y la posición del centroide de la ROI, aplicando una simple álgebra entre relaciones trigonométricas, es posible obtener la posición del Sol (θ , ϕ). Ésta está dada por la latitud, θ , y azimuth, ϕ , los cuales están determinados por (3.1.1) y (3.1.2), respectivamente.

$$\theta = \text{atan} \left(\frac{\sqrt{W^2 \cdot (x - x_c)^2 + L^2 \cdot (y - y_c)^2}}{FD} \right) = \text{atan} \left(\frac{R}{FD} \right) \quad (3.1.1)$$

$$\phi = \text{atan} \left(\frac{L \cdot (y - y_c)}{W \cdot (x - x_c)} \right) \quad (3.1.2)$$

donde W y L son el ancho y el largo de un píxel, respectivamente, (x_c, y_c) es el centroide de la ROI cuando $\theta = 0^\circ$ y FD es la distancia focal (distancia entre la matriz de píxeles y la lámina que actúa como óptica).

Asimismo, conociendo el pitch del píxel (W y L) y las dimensiones de la matriz de píxeles ($M \times N$) es posible determinar el ángulo máximo de incidencia de la luz solar y el campo de visión del sensor. Se define R_{max} como el radio máximo de la proyección de la luz solar sobre la matriz de píxeles, es decir, la distancia máxima entre el centro de la matriz y una de sus esquinas, pudiendo ser calculada a través de (3.1.3).

$$R_{max} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(W \cdot M)^2 + (L \cdot N)^2} \quad (3.1.3)$$

Por tanto, mediante la expresión anterior y sabiendo la distancia focal, se determina el máximo ángulo de incidencia de la luz solar mediante la relación dada por (3.1.4).

$$\theta_{max} = \text{atan} \left(\frac{R_{max}}{FD} \right) \quad (3.1.4)$$

Con ello, el campo de visión, FOV, que se define como el ángulo abarcable a través del cual el sensor puede detectar la radiación electromagnética que se desea captar, se calcula a través de (3.1.5).

$$FOV = 2 \cdot \theta_{max} = 2 \cdot \text{atan} \left(\frac{R_{max}}{FD} \right) \quad (3.1.5)$$

Obsérvese que todos estos parámetros de interés se ilustran en la Figura 3.1.1a, donde D es el diámetro de la abertura de la lámina que actúa como óptica, y T el grosor de la lámina. Además, si se analiza la última expresión (3.1.5), se observa que es posible ajustar la FOV mediante la distancia focal, puesto que al ser inversamente proporcional a FD , el campo de visión se puede aumentar si se disminuye FD . Con lo cual, se deduce que la distancia focal es otro parámetro de diseño adicional que hay que tener en cuenta.

En la implementación física de la Figura 3.1.1b, las dimensiones de la matriz de píxeles es $M = N = 64$ píxeles, y el tamaño (*pitch*) de cada píxel es $W = L = 19,5 \mu\text{m}$. Además,

debido al pequeño diámetro del orificio por el que se deja pasar la iluminación, no es posible apreciarla en la imagen, pero en este caso se está empleando una lámina de aluminio con un grosor $T = 0,5$ mm y un diámetro $D = 0,3$ mm.

Por último, cabe resaltar que en general, los satélites que tienen incorporados los sensores solares para la determinación y control de actitud, necesitan que la luz incida directamente sobre ellos para poder operar. Por este motivo, normalmente en los satélites cúbicos se colocan varios sensores solares en cada una de sus caras, garantizando el funcionamiento de alguno de los sensores en todo momento. Por otro lado, aunque el objeto de interés es el Sol, el cual es extremadamente brillante en un cielo en su mayoría oscuro, existen perturbaciones debido a la presencia de estrellas (mucho menor brillantes). Sin embargo, una de las ventajas que presentan estos sensores es que no es necesario para el procesamiento de las imágenes que sean nítidas, ya que se puede extraer información relevante a pesar de tener malas condiciones de iluminación.

Una vez descrito cómo opera el sistema, se exponen las diferentes arquitecturas del píxel que presenta los dos prototipos de sensores solares, así como sus modos de operación y cómo se realiza el cálculo del centroide de la región iluminada.

3.2. Estructura de los sensores solares

En este trabajo se caracterizan experimentalmente dos tipos de sensores solares, de modo que en la Figura 3.2.1 se muestra una microfotografía del chip donde están integrados éstos, denominados como: **sensor solar octopus** y **sensor solar continuo**. Para comprender el funcionamiento de cada uno de ellos, a lo largo de este capítulo se exponen los esquemáticos de los píxeles, sus principios de funcionamiento, los diferentes modos de operación según las señales que estén habilitadas y la circuitería digital/ algoritmo para el cálculo del centroide de la región iluminada.

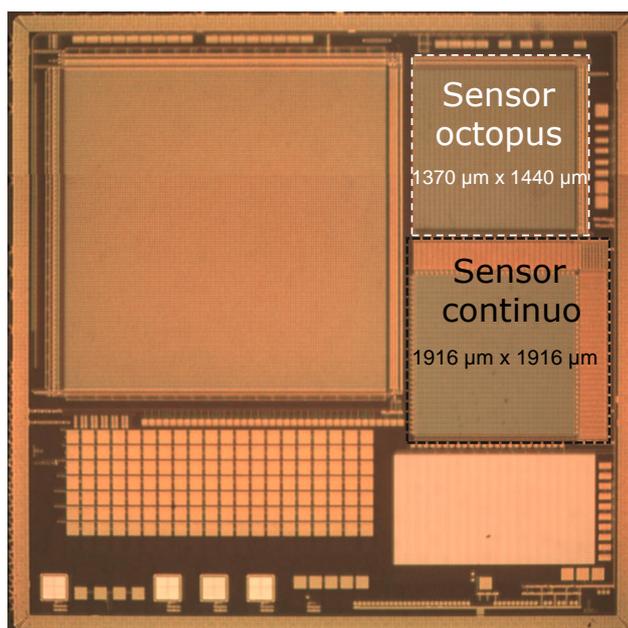


Figura 3.2.1: Microfotografía del chip donde están integrados los dos tipos de sensores solares.

En los dos sensores solares los fotodiodos están operando siempre en la región foto-voltaica (la unión pn está polarizada en directa), de forma que cuando son iluminados establecen una tensión entre sus terminales igual a la tensión de circuito abierto, V_{oc} . Este parámetro se define como la máxima tensión que puede ser almacenada en una batería conectada en paralelo a un fotodiodo operando como una celda solar (sección 2.1.3) [21]. Típicamente, si se está operando bajo condiciones de iluminación normales en una tecnología CMOS, el rango de dicha tensión V_{oc} está comprendida entre 200 y 550 mV.

Por otro lado, la tecnología empleada ha sido de 180nm de UMC MM/RF, 1.8V/3.3V 1P6M (una capa de silicio policristalino y seis de metal) de triple pozo. Además, la tensión de alimentación se denota como V_{DD} , cuya referencia es tierra, GND.

Asimismo, en la Figura 3.2.2 [21] se presenta la estructura del tipo de fotodiodo que se utiliza en los dos sensores. Se trata de una unión *Deep-N-Well* (DNW)/*P-Well* (D_2) y *P-Well/N-DIFF* (D_1) conectados en paralelo, ya que el DNW está cortocircuitado a tierra con el sustrato de tipo p. En el circuito equivalente de la configuración del fotodiodo se representan las capacidades parásitas de cada unión, C_{pd1} y C_{pd2} , que engloban las capacidades de unión y de difusión.

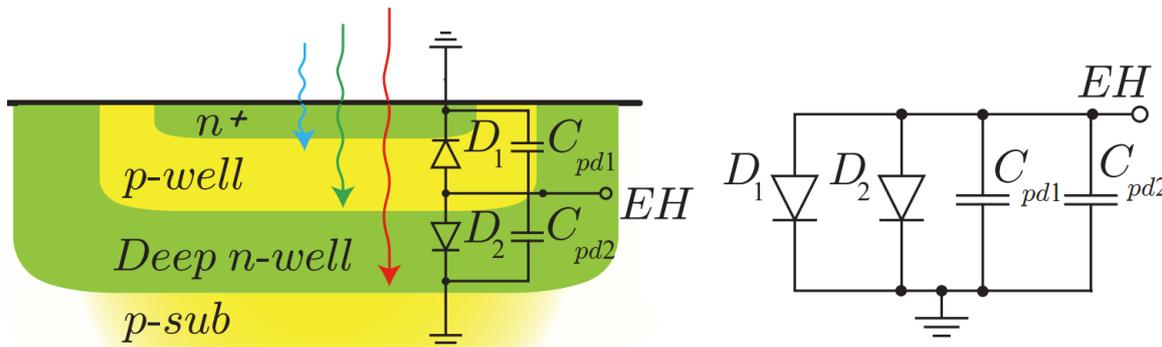


Figura 3.2.2: Configuración del fotodiodo operando como celda solar junto con su circuito equivalente.

Los dos prototipos de sensores solares envían su información de forma asíncrona usando el protocolo de comunicación de representación de dirección de eventos (*Address Event Representation* - AER), en el que el sensor de imagen es el elemento emisor (*sender*) y la FPGA es el receptor (*receiver*), tal y como se describió en la sección 2.4.

A continuación, se procede a describir los respectivos sensores individualmente, presentando los esquemáticos y diagramas de interés.

3.2.1. Esquemático del píxel del sensor octopus

Con el fin de entender cómo opera el píxel de este sensor solar, el cual a partir de ahora se denota como **sensor octopus**, se muestran en la Figura 3.2.3 las señales de entrada y salida para poder explicar a partir de ello la utilidad de cada una de éstas:

- V_{DD} y GND : tensión de alimentación y tensión de referencia (tierra), respectivamente.
- V_{bias_comp} : tensión de alimentación del comparador.

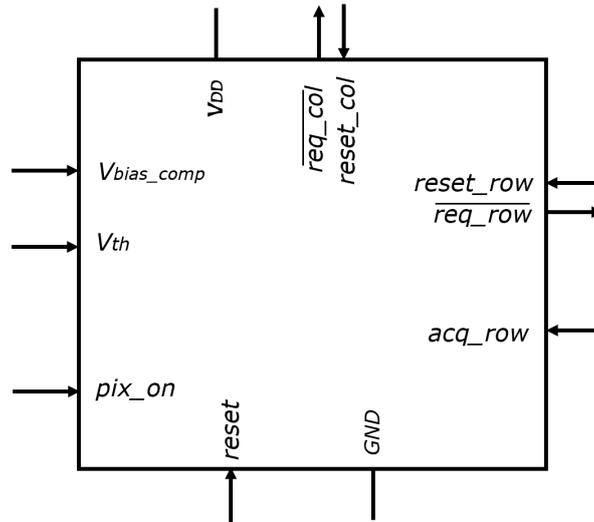


Figura 3.2.3: Símbolo representativo de las entradas y salidas del esquemático del píxel.

- pix_on : señal encargada de iniciar la operación del píxel cuando está activada. De forma que, comenzaría a circular la fotocorriente por el fotodiodo, iniciándose el proceso de sensado.
- V_{th} : tensión umbral del comparador ajustable. Si la tensión V_{oc} del fotodiodo supera dicho umbral, realiza la petición de lectura. Es decir, esta señal establece el mínimo valor de la tensión V_{oc} a partir de la cual el fotodiodo está iluminado.
- $reset$: cuando esta señal está activada, el condensador del píxel se descarga prácticamente a la tensión del transistor de reset, que se corresponde con GND .
- $\overline{req_col}$ y $\overline{req_row}$: realizan la petición de lectura por columnas y por filas, respectivamente.
- $reset_col$ y $reset_row$: se encargan de bloquear el píxel cuando ambas señales están activas.
- acq_row : señal que permite realizar la petición por columnas una vez que se ha efectuado la petición por filas.

El esquemático del píxel se muestra en la Figura 3.2.4. Como se observa, el fotodiodo está polarizado en directa (opera como celda solar), estando su ánodo conectado a una de las entradas del comparador, y al transistor de reset para resetearlo cuando la señal $reset$ esté habilitada. La otra entrada del comparador se corresponde con la tensión umbral, V_{th} , la cual puede ajustarse para modificar la sensibilidad del píxel, y así considerar más o menos píxeles iluminados, evitando de este modo perturbaciones debidas a la iluminación. Además, el esquema del píxel cuenta con dos transistores de pull-up (se corresponden con los representados en azul en la Figura 3.2.4), cuya funcionalidad se explica a lo largo de esta sección.

El comparador empleado, cuyo esquemático se muestra en la Figura 3.2.5, es un OTA 5-T simple operando en inversión débil para conseguir un menor consumo en la operación, una etapa inversora para lograr un aumento de la ganancia y un inversor como etapa de buffer. Además, presenta una señal $enable$, que si no está activada, la salida del comparador se establece a nivel bajo, desactivando su consumo estático de corriente, y con ello, se reduce el consumo de potencia de la matriz de píxeles en estado de reposo.

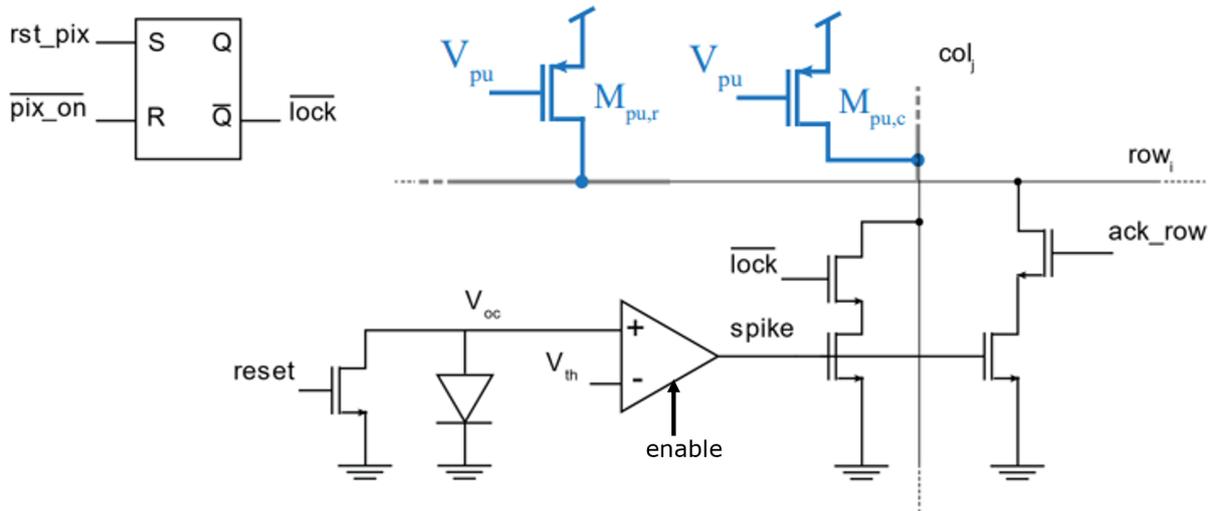


Figura 3.2.4: Esquemático del píxel del sensor octopus, compuesto por un fotodiodo operando como celda solar, un transistor de reset, un comparador y dos transistores de pull-up.

El comparador y los transistores conectados a las líneas col_j y row_i (que se corresponden con las señales denotadas como $\overline{req_col}$ y $\overline{req_row}$, respectivamente) se encargan de realizar la petición de lectura del píxel cuando la tensión V_{oc} del fotodiodo supera a la tensión umbral, V_{th} . Si se llega a esta situación, se ponen a nivel bajo estas líneas y los transistores de pull-up se encargan de ponerlas a nivel alto cuando no se está realizando ninguna petición. Por tanto, se identifica si se está realizando alguna petición de lectura del píxel en los flancos de bajada de las señales $\overline{req_col}$ y $\overline{req_row}$.

Por otro lado, la señal $lock$, que es la salida de un latch SR, cuyas entradas de set y $reset$ son las señales rst_pix (es la salida de la NAND con entradas $reset_row$ y $reset_col$) y $\overline{pix_on}$, respectivamente, se encarga de bloquear el píxel si se encuentra

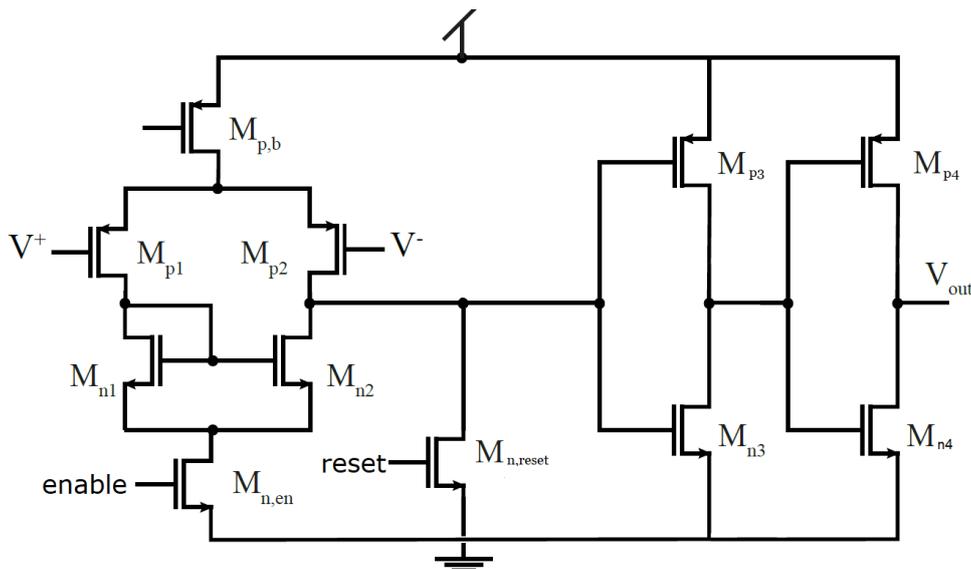


Figura 3.2.5: Esquemático del comparador utilizado en el píxel del sensor octopus. La señal $enable$ si no está activada, establece la salida a nivel bajo.

a nivel alto. Por tanto, para que se desactive el píxel se tiene que cumplir que la señal pix_on esté a nivel bajo (lo cual significa que no se están detectando fotones), y la señal de $reset$ se encuentre a nivel alto. Es decir, cada vez que tiene lugar la lectura del píxel, éste se bloquea, permitiendo de esta forma reducir el consumo (al no estar midiendo iluminación continuamente, ya que el comparador estaría inhabilitado).

En la Figura 3.2.7 se muestra la ROI de la matriz de píxeles a modo de esquema para ilustrar cómo opera este sensor. La región iluminada se corresponden con los píxeles cuya tensión V_{oc} ha superado al umbral del comparador, y como consecuencia solicitan acceso al bus de comunicación para transmitir sus coordenadas (fila, columna), produciéndose un flanco de bajada de la señal $\overline{req_row}$. Para poder afrontar las posibles colisiones de peticiones se emplea un arbitrariador, con el fin de gestionar los posibles errores/pérdidas en el envío de direcciones. En este caso se concede prioridad a la fila cuya petición ha llegado con anterioridad.

Una vez que el arbitrariador le otorga permiso al bus a un determinado píxel, se activa la señal ack_row , permitiendo la petición por columnas y con ello teniendo lugar un flanco de bajada de la señal $\overline{req_col}$. En este momento las señales de peticiones por filas y columnas están a nivel bajo, lo que significa que el píxel tiene acceso al bus compartido y sus coordenadas (x, y) se transmiten al exterior. La periferia una vez que confirma la recepción de la información, se encarga de activar las señales de reset en la fila y en la columna del píxel correspondiente, es decir, se ponen a nivel alto las señales $reset_row$ y $reset_col$. Estas dos señales son la entrada de una puerta NAND, cuya salida es la señal rst_pix . Con lo cual, como esta última señal está a nivel alto, el píxel correspondiente se bloquea al activarse como consecuencia la señal $lock$. Finalmente, las coordenadas corres-

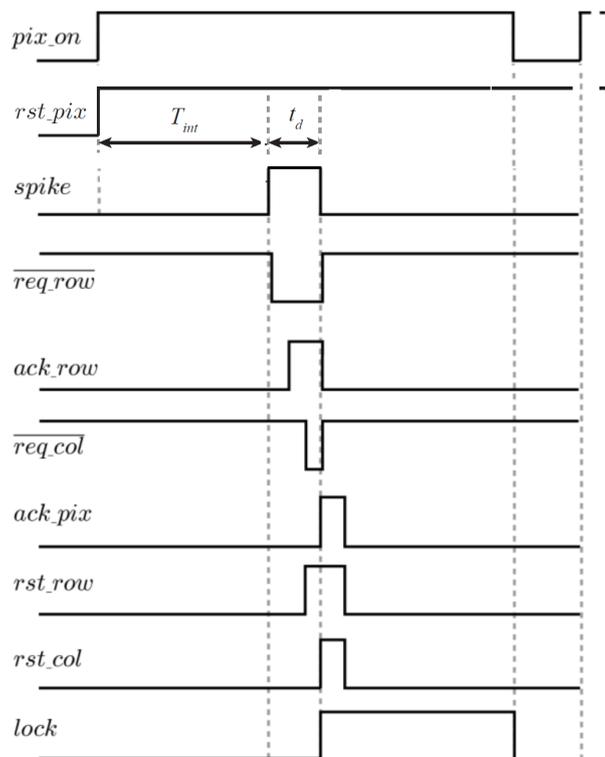


Figura 3.2.6: Cronograma de las señales involucradas en la operación del píxel.

pondientes (x, y) de cada píxel se codifican como una señal de 6-bits (64 filas/columnas). En la siguiente Figura 3.2.6 se muestra a modo de resumen aclaratorio un cronograma de las diferentes señales involucradas en la operación del píxel.

Por último, en la Figura 3.2.7 se muestra la arquitectura del sensor tipo octopus incluyendo los bloques importantes para ilustrar en conjunto el sensor completo. El bloque central se corresponde con la matriz de píxeles de dimensión 64×64 , mientras que en la periferia se encuentra la lógica asíncrona para manejar la comunicación AER entre los píxeles y la FPGA (se encarga de enviar la información al exterior de las coordenadas (x, y) de los píxeles iluminados), cuyo bloque principal son los arbitrades (explicada su funcionalidad en la sección 2.3).

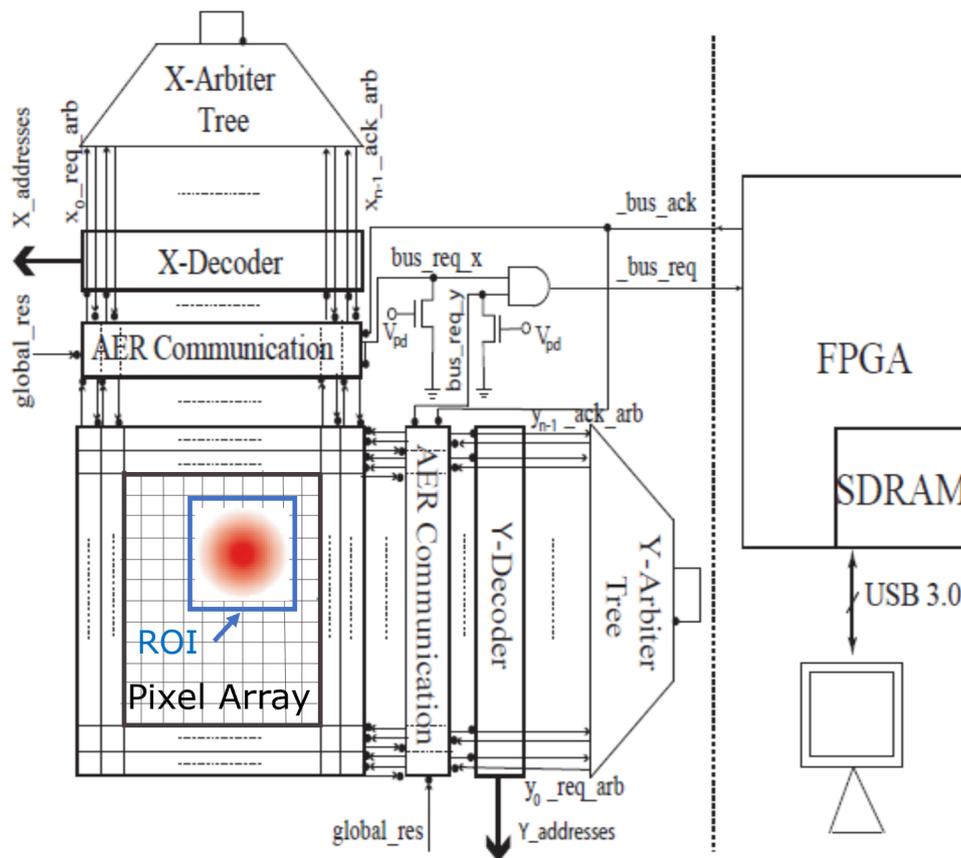


Figura 3.2.7: Diagrama de los principales bloques del sistema. El bloque central es la matriz de píxeles, y en la periferia se encuentra la lógica asíncrona para la comunicación entre los píxeles y el exterior mediante una FPGA.

3.2.2. Esquemático del píxel del sensor continuo

De nuevo, para explicar la operación del píxel, el cual a partir de ahora se denota como **sensor de operación continuo**, se presenta un esquema de las diferentes señales de entrada y salida, tal y como se ilustra en la Figura 3.2.8. Sin embargo, para evitar información redundante, las señales que tienen comunes ambos píxeles, no se describen nuevamente. Como se observa, en este caso, se prescinde de las señales de reset de bus de filas y columnas y de la señal habilitadora de petición por columnas, puesto que en este sensor no se transmiten al exterior las coordenadas (x, y) de todos los píxeles que

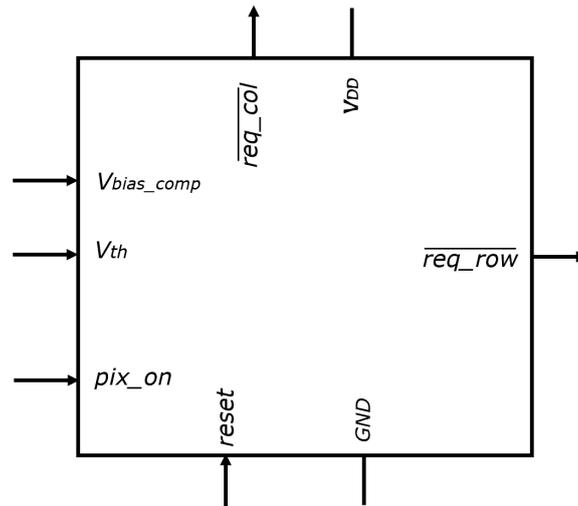


Figura 3.2.8: Símbolo representativo de las entradas y salidas del esquemático del píxel.

son iluminados alcanzando una tensión V_{oc} superior al umbral V_{th} del comparador. En la sección 3.4 se describe cómo obtiene el centroide de la región iluminada a través de la propia lógica circuital del sensor, sin necesidad de realizar ningún cálculo posterior a la recepción de la información.

En la Figura 3.2.9 se introduce la estructura del píxel del presente sensor solar. El fotodiodo está conectado como celda solar a una de las entradas del comparador, y a su vez, al transistor de reset (igual que en el sensor de tipo octopus). Además, cuenta con los dos transistores de pull-up (representados de color azul), que poseen la misma funcionalidad que en el sensor octopus. Las señales compartidas row_i y col_j están a nivel alto ante la ausencia de iluminación.

El esquemático del comparador empleado se muestra en la Figura 3.2.10, que está compuesto por un OTA 5-T simple, operando también en inversión débil para garantizar un reducido consumo en su operación, y un inversor con operación de buffer. Este comparador presenta la señal *enable* cuya funcionalidad es igual al del comparador del píxel

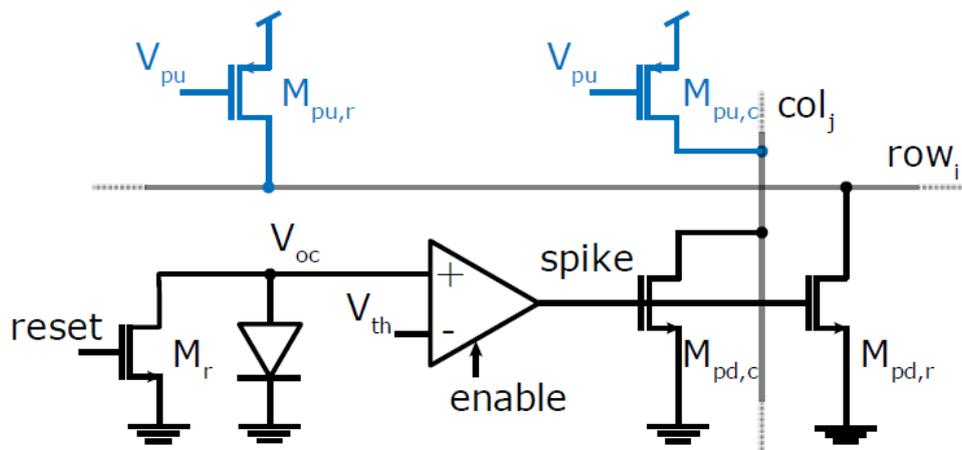


Figura 3.2.9: Esquemático del píxel del sensor de operación continua, compuesto por un fotodiodo operando como celda solar, un transistor de reset, un comparador y dos transistores de pull-up.

i y columna j está iluminado, registrándose en una memoria de 1-bit empleando la señal externa *capture*. Se obtiene una región iluminada, correspondiente a la ROI, representada en la Figura 3.2.11 [3], a partir de la cual se calcula a partir de una circuitería lógica el centro de las filas y columnas activadas, codificando dichas coordenadas en una dirección de 6-bits (64 filas/columnas).

Dependiendo de las señales que estén habilitadas en los respectivos sensores cuando están operando, se pueden diferenciar diferentes modos de operación, los cuales se describen para cada uno de ellos en la siguiente sección.

3.3. Modos de operación

Antes de describir los diferentes modos de operación de los sensores solares, se explica brevemente el concepto de integración de la carga. Cuando los fotodiodos son iluminados por la luz presente en el entorno, comienza el estado de sensado. En este momento, los fotodiodos integran la carga almacenada en la capacidad total parásita en el nodo de entrada del comparador, es decir, la suma de la capacidad parásita de la unión pn que constituye el fotodiodo, C_{ph} , y la capacidad de entrada del comparador, C_{comp} ; dando lugar a que dicha capacidad está dada por (3.3.1). La capacidad parásita del diodo es la suma de la capacidad de difusión, $C_{diffusion}$, que modela el tiempo que tardan los procesos de difusión en alcanzar un equilibrio, y de la capacidad de unión, C_{union} , que determina las propiedades de conmutación del diodo.

$$C_{int} = C_{ph} + C_{comp} = (C_{diffusion} + C_{union}) + C_{comp} \quad (3.3.1)$$

Se define el tiempo de integración, T_{int} , como el tiempo desde que el píxel se ha reseteado hasta que el comparador cambia de estado [1, 21], es decir, cuando la tensión del fotodiodo alcanza la tensión umbral del comparador, produciéndose un flanco de subida de la señal *spike* (obsérvese la Figura 3.2.6). Si se considera que la corriente del fotodiodo, I_{ph} , es constante durante todo este intervalo, se tiene que el tiempo de integración viene dada por la expresión (3.3.2). Obsérvese que es inversamente proporcional a la corriente que circula por el fotodiodo, y depende de la tensión umbral del comparador.

$$T_{int} = \frac{C_{int}}{I_{ph}}(V_{DD} - V_{th}) \quad (3.3.2)$$

De esta forma se obtiene un mapa 2D de iluminación, ya que a partir de los valores de tiempo proporcionados por el sensor, se pueden convertir en valores de iluminación, simplemente realizando la inversa. Aunque se tendría que multiplicar por una constante dada por $C_{int}(V_{DD} - V_{th})$, como el valor de la capacidad de integración es desconocido, se escalan los valores obtenidos y se normalizan, consiguiéndose el mismo resultado que si se conociera dicha constante.

Además, cabe resaltar que el tiempo de integración está relacionado con el consumo de potencia del sensor, puesto que ante una disminución de dicho tiempo, se reduce notablemente tanto la latencia del sensor como consumo medio de corriente de los transistores de pull-up y del comparador.

En el caso del **sensor octopus** se distinguen dos modos de operación dependiendo de las señales que estén habilitadas:

- **Time-to-First-Spike (TFS).** Si la señal *reset* se habilita antes de la señal *pix_on*, los niveles de iluminación se codifican en el tiempo en el que el fotodiodo tarda en alcanzar la tensión umbral del comparador. El tiempo que tardaría la matriz de píxeles en sensar la iluminación estaría determinada por el píxel que presente mayor tiempo de integración, es decir, el que posea menor nivel de iluminación.
- **Modo continuo.** Durante este modo de operación la tensión del fotodiodo está continuamente actualizándose. Por tanto, la medida temporal es independiente del tiempo de integración. Sin embargo, como los píxeles no se están leyendo en orden, es necesario leer todos los píxeles de la matriz iluminados, con lo cual, el retraso estaría determinado por el tiempo que tarda el sensor en leer todos estos píxeles. Nótese que el tiempo de integración se selecciona de forma que las señales *req_row* y *req_col* tengan suficientemente tiempo para poner a nivel bajo las líneas de petición por filas y columnas, respectivamente.

Por otro lado, en el **sensor continuo**, dependiendo de si la señal *reset* está habilitada antes o después del sensado, el píxel tiene dos modos de operación diferentes:

- **Modo de integración.** La señal *reset* se activa antes de tomar la medida. Con lo cual, como el tiempo de integración es el tiempo en el que el píxel está disponible antes de registrar las líneas de salida, el retraso del sensor se puede estimar como la suma del T_{int} , el tiempo de *hold* de los registros, T_{hold} y retraso de propagación de la lógica de cálculo del centroide, T_{logic} , quedando que $T_{int} \gg T_{hold} + T_{logic}$. Esto significa que T_{int} se selecciona lo suficientemente grande para que los fotodiodos alcancen V_{th} .
- **Modo continuo.** Alternativamente operando en el modo continuo la señal *reset* se activa después de realizar la medición. Las tensiones de los fotodiodos están continuamente actualizándose, precargándose a la tensión V_{oc} en todo momento. Las líneas de filas y columnas de la matriz de píxeles se activan al habilitarse la señal *enable*. Al igual que en el modo continuo del sensor octopus, el tiempo de integración puede ser tan corto como el tiempo que tarda en bajar las señales fila/columna.

3.4. Circuitería digital para el cálculo del centroide

El propósito principal de los sensores solares es conocer la posición relativa del Sol respecto al sensor, y para ello es necesario determinar el centroide de la región iluminada. Por tanto, en este apartado se explica detalladamente el cálculo del centro del área iluminada de la matriz de píxeles por cada uno de los dos prototipos de sensores solares.

3.4.1. Determinación centroide con el sensor octopus

La información que proporciona el sensor de tipo octopus al exterior es un array de valores de tiempo, que se convierte en niveles de iluminación, y se trabaja sobre dicho vector de dimensión 4096.

Cada posición de dicho vector se corresponde con el valor de iluminación del píxel correspondiente a dicha posición, ya que el vector se convierte en una matriz de dimensión 64×64 .

En los dos modos de operación la matriz contiene los niveles de iluminación de los píxeles cuya tensión V_{oc} supera la tensión umbral del comparador, obteniendo un mapa 2D de niveles iluminación tal y como se ilustra en la Figura 3.4.1a.

Dependiendo del modo en el que está operando el sensor, la información se procesa de diferente forma. En el modo Time to First Spike (TFS), los valores de tiempo en el que se codifica los niveles de iluminación se corresponden con el tiempo de integración, lo que significa que se puede calcular el centroide de la región iluminada de dos formas diferentes.

En primer lugar, si se considera que los fotodiodos que presentan una $V_{oc} > V_{th}$ toman el valor '1', equivalente a una representación de píxeles de color blanco, y los fotodiodos con una $V_{oc} < V_{th}$ se representan de color negro, se consigue un área iluminada idealmente con la forma de la óptica por donde entran los rayos solares, tal y como se muestra en la Figura 3.4.1b. Una vez que se conoce el área de píxeles iluminados, una forma sencilla de determinar el centroide (x_c, y_c) , es considerando un rectángulo que englobe toda la región (representado en rojo en la Figura 3.4.1b). De este modo, si se calcula el centro de dicho rectángulo mediante la expresión dada por (3.4.1), donde x_{max} y x_{min} son las coordenadas 'x' del píxel del extremo derecho e izquierdo de la región, respectivamente, y y_{max} e y_{min} las coordenadas 'y' del píxel del borde superior e inferior del área iluminada, respectivamente, se consiguen las coordenadas del centroide de la región iluminada (x_c, y_c) , puesto que se corresponde con el punto medio. En este caso se están despreciando los píxeles iluminados que no presentan fotodiodos vecinos que detectan los rayos solares, ya que si no fuera así, el centro del rectángulo no se correspondería con el de la ROI.

$$\left. \begin{aligned} x_c &= (x_{max} + x_{min})/2 \\ y_c &= (y_{max} + y_{min})/2 \end{aligned} \right\} \quad (3.4.1)$$

Es importante resaltar que este modo presenta una ventaja que favorece a la mejora de la resolución espacial en el cálculo del centroide de la región iluminada. Si en el cómputo además de tener en cuenta las posiciones geométricas de los píxeles iluminados se consideran también sus niveles de iluminación, al realizar una media ponderada se puede tener

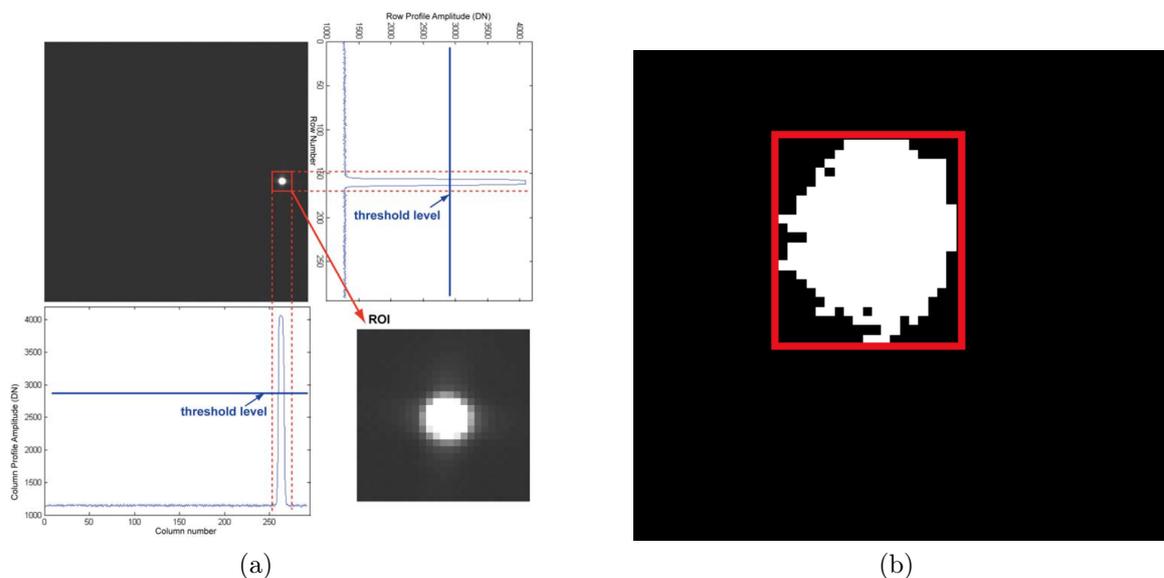


Figura 3.4.1: Esquema del algoritmo que determina el centroide de la región iluminada.

una resolución subpíxeles. Es decir, en lugar de utilizar la expresión (3.4.1) para determinar el centroide, se emplea (3.4.2), donde $im(i, j)$ son los niveles de iluminación de los píxeles correspondientes a la fila ' i ' y columna ' j ', y N el número de píxeles iluminados. Como el sensor presenta un alto rango dinámico, favorece que se puedan estimar los niveles dispares de iluminación de la matriz de píxeles con precisión. Además, si se representan los niveles de iluminación frente a la posición (x, y) se distingue claramente que el centroide está cerca del centro de la región iluminada, donde se encuentran los píxeles con mayor iluminación (Figura 4.2.2). Esta alternativa se analiza con más detalle en la sección 4.1.1.

$$\left. \begin{aligned} x_c &= (im(i, j) \cdot i) / N \\ y_c &= (im(i, j) \cdot j) / N \end{aligned} \right\} \quad (3.4.2)$$

Por otra parte, como está demostrado que los píxeles del centro de la región iluminada presentan mayor nivel de intensidad que los que se encuentran en los extremos de dicha área [1], otra alternativa del modo TFS es considerar que las coordenadas del centroide se corresponden con las del primer fotodiodo que alcanza la tensión umbral del comparador, es decir, el más iluminado, el que tiene menor tiempo de integración. De esta forma no sería necesario leer todos los valores de iluminación de los píxeles, reduciendo el consumo de corriente del comparador; sin embargo, aunque el tiempo de respuesta es más rápido que en el modo continuo, la resolución espacial es peor.

Por otro lado, en el modo continuo, se calcula el centroide con el mismo algoritmo empleado en el modo TFS. La principal ventaja de este método es que presenta mayor rapidez de cálculo, ya que las tensiones de los fotodiodos se están actualizando continuamente.

3.4.2. Determinación centroide con el sensor continuo

En cuanto al cálculo del centroide empleando el sensor continuo, es totalmente distinto, ya que la propia lógica circuital de la periferia del sensor proporciona al exterior las coordenadas (x_c, y_c) , como se ilustra en la Figura 3.4.2a [3], computando el centro de las líneas activadas. La lógica está compuesta por varias etapas en cascada, y cada una de ellas presenta un filtro de bordes y un multiplexor a la salida, como se observa en la Figura 3.4.2a. El filtro de bordes se implementa mediante un operador AND entre dos líneas vecinas, de forma que cada etapa elimina las dos líneas contiguas a una desactivada. Por tanto, el número de etapas depende del tamaño de la zona iluminada (número de líneas activadas), con lo cual, son necesarias $M/2$ etapas para obtener el centroide, siendo M el número de filas/columnas. En la Figura 3.4.2a se muestran las líneas activadas a la entrada y a la salida del filtro.

En el caso en el que se activan menos de tres líneas en la entrada del circuito, no se activa ninguna línea a la salida. Con el objetivo de suavizar este efecto, cada etapa contiene un multiplexor que se encarga de transmitir la salida del filtro de bordes o la salida de la última etapa, dependiendo de si la señal *stage_en* está activada o no. Si se activa alguna salida del filtro de bordes de una etapa, la señal *stage_en* se tira hacia abajo, y de esta forma indica que los datos de la correspondiente etapa son válidos. Por contra, si la señal *stage_en* está desactivada, el multiplexor emite los datos de la última etapa. Una información importante es que es necesario reiniciar los registros una vez leídos los datos del centroide, con el fin de reducir el tiempo que fluye una corriente estática a través de las redes de pull-up de estas señales.

Asimismo, para ilustrar la información que proporciona el sensor al exterior se presenta

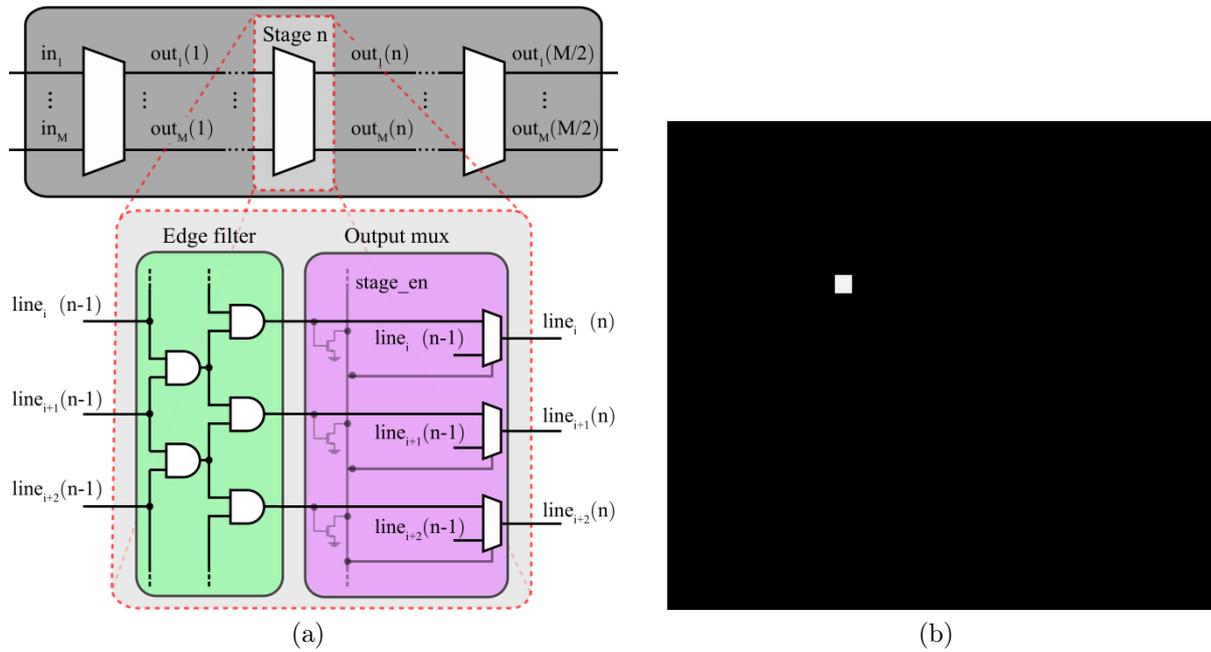


Figura 3.4.2: (a) Esquema de la lógica circuital que calcula el centroide de la región iluminada. (b) Información que proporciona el sensor al exterior, se corresponde las coordenadas (x_c, y_c) .

la Figura 3.4.2b, donde se observa que únicamente se conocen las coordenadas del centroide de la región iluminada, pero no se tiene más información acerca de la ROI.

Por último, en la Figura 3.4.3 [3] se muestra en esquema aclaratorio de las diferentes etapas que constituyen en bloque que calcula el centroide de la región iluminada. Aunque haya alguna línea espuria activada, los filtros de borde se encargan de eliminarla para el cómputo.

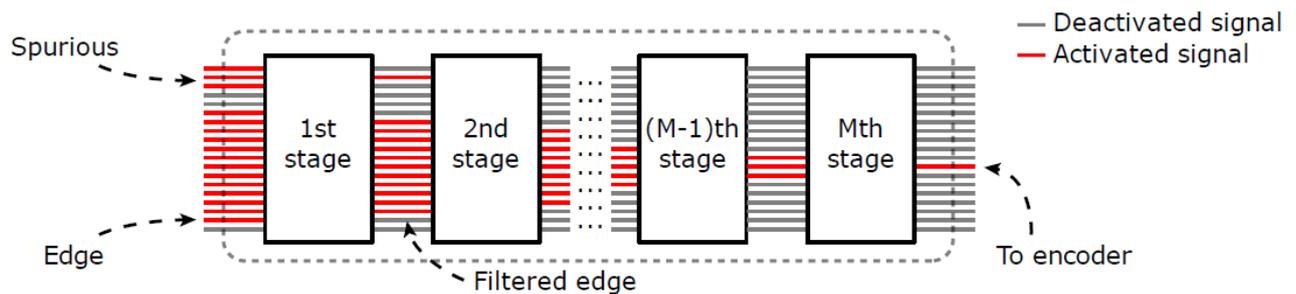


Figura 3.4.3: Esquema de las diferentes etapas que constituyen el bloque encargado de la determinación del centroide de la región iluminada.

Gracias a que los fotodiodos de los dos sensores solares operan en la región fotovoltaica, se reduce el consumo de energía en el funcionamiento de los dispositivos, ya que actúan como fuentes de energía. Una de las principales ventajas que presenta el sensor continuo frente al de tipo octopus es que calcula el centroide de la región iluminada dentro del chip, sin necesidad de tener que procesar la información y aplicar algoritmos para su cómputo. Sin embargo, la resolución espacial es menor en la determinación del centroide, y a diferencia del sensor octopus, en el de operación continuo no es posible conocer los niveles de iluminación de los píxeles iluminados de la matriz de píxeles, pero el consumo

de energía es menor.

Capítulo 4

Resultados de la caracterización experimental

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras la caracterización experimental de los dos prototipos de sensores solares en el laboratorio de optoelectrónica del Instituto de Microelectrónica de Sevilla. Se reportan las características estáticas, resolución, precisión, sensibilidad del fotodiodo, consumo de corriente, latencia, así como la velocidad de operación. Por último, se realiza una comparación entre los dos tipos de sensores solares, mencionando las ventajas y desventajas de uno frente al otro; además de presentar una tabla comparativa del estado de arte entre diferentes tipos de sensores solares destacados.

4.1. *Setup* experimental para la calibración

Con el objetivo de caracterizar las propiedades estáticas de los sensores solares se dispone del siguiente *setup* experimental que se muestra en la Figura 4.1.1. Con ello, es posible calibrar y conocer el error de los ángulos que determinan la posición de un foco de luz (como por ejemplo una bombilla de laboratorio, o el Sol en aplicaciones espaciales), latitud y azimut, tomando como referencia una regla medidora de ángulos digital. En concreto, según la Figura 3.1.1, el *setup* de la Figura 4.1.1a se emplea para determinar el azimut a latitud constante, mientras que la Figura 4.1.1b se utiliza para obtener el error de la latitud dentro del campo de visión (FOV, *Field of View*). Tal y como se observa en esta figura se dispone de una bombilla que emula la luz solar, una regla medidora de ángulos digital como referencia y un soporte para su fijación.

Los dos prototipos de sensores solares están diseñados para proporcionar el centroide de la región iluminada, uno de ellos es capaz de calcularlo mediante la propia lógica circuital que lo compone y en el otro, se emplea un algoritmo (descrito en la sección 3.4) incorporado a la interfaz que se utiliza para el control de los dispositivos. Teniendo esto en cuenta, el procedimiento para la obtención de los resultados es el que se describe a continuación.

En primer lugar, para determinar el error cometido en la adquisición del azimut se procede a recorrer con el foco de luz una trayectoria circular en un plano paralelo al del sensor con el fin de recorrer los 360° de dicho desplazamiento. En concreto, se ha ido variando el ángulo del sensor cada 10° , se ha anotado el ángulo marcado por la regla

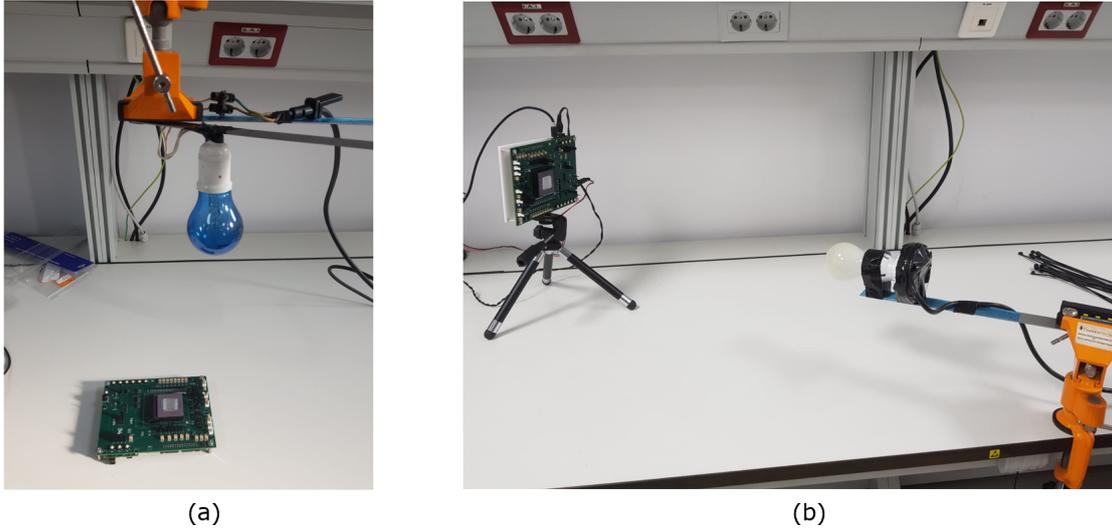


Figura 4.1.1: *Setup* experimental para medir las características estáticas de los sensores solares y los errores del (a) azimuth y (b) latitud.

medidora de ángulos y las coordenadas del centroide proporcionadas por el respectivo sensor en cada modo de operación. Luego, simplemente utilizando la expresión (4.1.1), se obtiene el valor experimental del azimuth y el error cometido en la medición con respecto a la referencia.

$$\phi = \text{atan} \left(\frac{L \cdot (y - y_c)}{W \cdot (x - x_c)} \right) \quad (4.1.1)$$

Por otro lado, para conocer la latitud de la bombilla que emula la luz solar, se traza una trayectoria variando la coordenada ‘ x ’ y dejando la coordenada ‘ y ’ constante (en la práctica ante las condiciones experimentales hay leves variaciones en el eje vertical). La forma de obtención del ángulo medido por cada sensor y del error cometido en la toma de cada medida, es idéntica a la del azimuth, la única diferencia es que en este caso como el campo de visión no es de 360° , sino de 115° , se hacen mediciones cada variación del ángulo de 5° , y que el ángulo experimental se determina empleando la expresión (4.1.2).

$$\theta = \text{atan} \left(\frac{\sqrt{W^2 \cdot (x - x_c)^2 + L^2 \cdot (y - y_c)^2}}{FD} \right) \quad (4.1.2)$$

Además, para comparar los resultados dependiendo de la óptica empleada y del diámetro del orificio por el que la luz solar ilumina al array del sensor, se han caracterizado los dos tipos de sensores solares utilizando dos ópticas distintas: una lámina de aluminio de 0.3 mm de diámetro y 0.5 mm de espesor; y, otra de cobre con un diámetro de 0.1 mm y un espesor inferior a 0.2 mm. En la Figura 4.1.2b se aprecia una imagen del sensor, incorporado en la placa PCB (*Printed Circuit Board*), incluyendo la óptica de aluminio y en la Figura 4.1.2a, una microfotografía del chip, siendo la dimensión de la matriz de píxeles (64x64) $1248 \mu\text{m}$, puesto que el largo y el ancho de cada píxel mide $19.5 \mu\text{m}$; ocupando los restantes $268 \mu\text{m}$ la periferia circuital del chip.

Para poder calcular a través de la relación trigonométrica la latitud del foco que emula al Sol, es necesario conocer la Distancia Focal (FD). Como inicialmente es una información desconocida, puesto que solo se sabe el grosor de la lámina empleada, se ha optado por

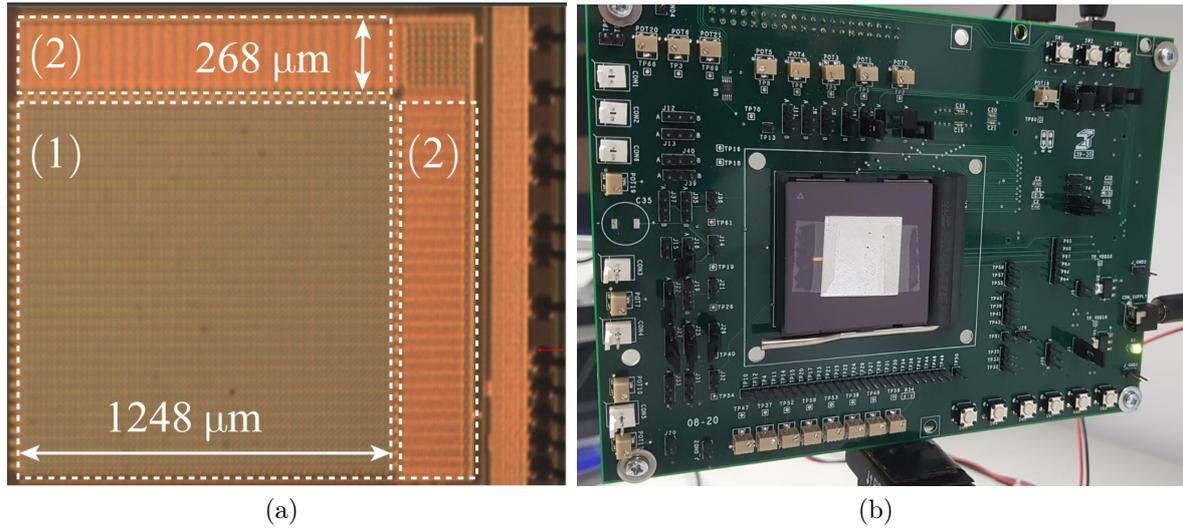


Figura 4.1.2: (a) Microfotografía del chip. (b) Foto del sensor incluyendo la lámina de aluminio con el orificio de 0.3 mm de diámetro.

realizar un ajuste lineal de las medidas tomadas para la calibración. Es decir, es posible conocer la latitud teórica a través del dato proporcionado por la regla medidora de ángulos. Por ello, a través de la expresión (3.1.1), es posible determinar mediante (4.1.3) FD, siendo ésta la pendiente de la curva de regresión lineal entre $\tan\theta$ y $pitch \cdot R$.

$$\theta = \text{atan} \left(\frac{pitch \cdot \sqrt{(x - xc)^2 + (y - yc)^2}}{FD} \right) \rightarrow \tan\theta \cdot FD = pitch \cdot R \quad (4.1.3)$$

Por consiguiente, para determinar la distancia focal de cada sensor empleando las dos cubiertas, se ha representado gráficamente el radio escalado ($pitch \cdot R$) frente a la tangente de la latitud teórica, resultando que FD es la pendiente de dicha recta. En la Tabla 4.1 se presentan la distancia focal para cada uno de los prototipos de sensores solares con cada una de las láminas empleadas.

Tabla 4.1: Distancia Focal (FD) de los prototipos de sensores solares para las diferentes láminas empleadas como óptica. La lámina de cobre tiene un diámetro de 0.1 mm, y la de aluminio de 0.3 mm.

	Octopus 0.1 mm	Octopus 0.3 mm	Continuo 0.1 mm	Continuo 0.3 mm
FD (μm)	558	937	1008	906

Es relevante tener en cuenta que existen factores que modifican la distancia focal debido a la no rigidez de la lámina menos gruesa, es decir, la de cobre de 0.1 mm de diámetro. Esto conlleva a que la cubierta se curve, y como consecuencia la distancia focal puede variar en las diferentes tomas de medidas, que, aunque el valor puede ser insignificante puede verse influenciado en los resultados.

Con el propósito de ilustrar cómo varía la posición ' x ' del centroide de la región iluminada en función de la latitud de la bombilla se muestra dicha representación en la Figura 4.1.3a, donde la coordenada ' y ' se mantiene constante. En esta gráfica se observa el campo de visión del sensor, ya que se estaría comprendido entre los ángulos a partir del

cual satura la latitud. Asimismo, en la Figura 4.1.3b se representa el movimiento seguido por la bombilla en el experimento llevado a cabo para la calibración del azimut (se recorren los 360°). Obsérvese la diferencia del radio de la trayectoria circular en función del tipo de lámina empleada; cuanto menor es el orificio de entrada de la luz solar, menor es el radio.

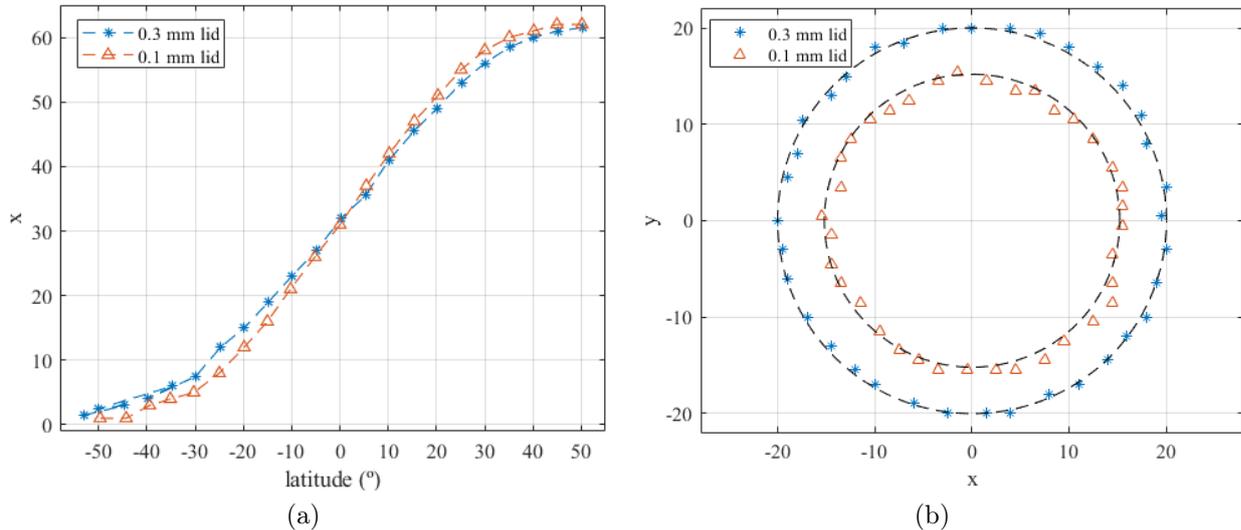


Figura 4.1.3: (a) Representación de la posición del centroide de la región iluminada en función de la latitud empleando el sensor solar continuo con las dos tipos de cubiertas, de cobre con un diámetro de 0.1 mm y de aluminio, de 0.3 mm. (b) Trayectoria seguida por el foco de luz en el experimento llevado a cabo para la calibración del azimut empleando las dos láminas.

A continuación, en los siguientes apartados, se presentan los resultados tras la calibración de los dos sensores solares, así como los errores de los ángulos de la latitud y azimut obtenidos a partir de la posición del centroide de la región iluminada de la matriz de píxeles empleando las expresiones (3.1.1) y (3.1.2).

4.2. Características estáticas del sensor octopus

Como el sensor solar de tipo octopus presenta tres modos distintos de operación: *Time-to-First-Spike* (TFS), considerando el primer píxel o toda la región iluminada (denotada a partir de ahora “con reset”), y el modo continuo sin reset, se proporcionan los resultados de la calibración dependiendo de las señales habilitadas durante el funcionamiento del sensor.

En primer lugar, en la Figura 4.2.1 se muestra la relación entre la latitud/azimut computada a través del centroide de la región iluminada y el valor de la latitud/azimut indicado por la regla medidora de ángulos tomada de referencia. Además, se representa el error cometido en la medición con respecto a la referencia para cada ángulo que determina la posición del Sol. Las líneas horizontales discontinuas negras indican el rango de la resolución en cada caso. Obsérvese que como consecuencia de que el campo de visión del sensor no es de 120° (rango de ángulos medidos), la latitud satura y se ha ampliado la gráfica en la región de interés para ver el comportamiento que presenta el error cometido

en la medición.

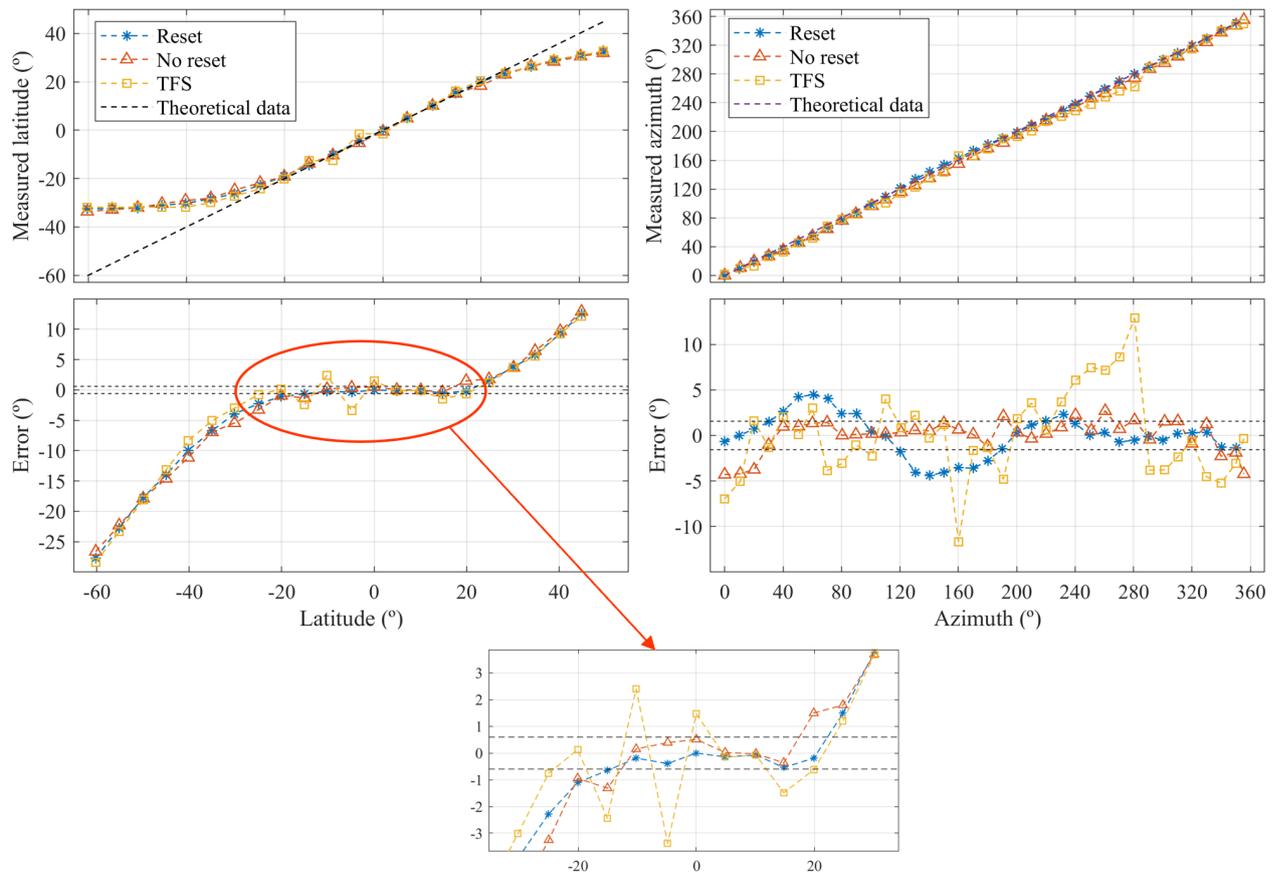


Figura 4.2.1: Representación gráfica de las medidas experimentales de los ángulos que determinan la posición del Sol, latitud a la izquierda y azimuth a la derecha, en función de sus valores teóricos. Las gráficas inferiores se corresponden con el error cometido en la medición en cada ángulo en función del valor teórico.

Como la resolución es el mínimo incremento del radio que ofrece un cambio del azimuth, dependiendo de en qué modo esté funcionando el sensor, la resolución será diferente. Cuando el sensor está operando en TFS la mínima variación posible es de un píxel, mientras que con y sin reset es de 0,5 píxeles, puesto que se está calculando el centroide de la región iluminada considerando un rectángulo que engloba dicha área. De esta forma, si se considera que el mínimo desplazamiento es Δy píxel hacia arriba, permaneciendo constante la coordenada 'x' y variando 'y', se tendría que $y - y_c = 1$ y que $x - x_c = R$, llegando a la siguiente expresión general de la resolución 4.2.1; donde R es el radio de la circunferencia que forma la bombilla al recorrer los 360° .

$$\Delta\phi = \text{atan}\left(\frac{\Delta y}{R}\right) \quad (4.2.1)$$

Es decir, Δy vale 0.5 para el caso en el que se esté calculando el centroide a través del algoritmo que engloba toda la región iluminada, y vale 1 cuando se considera que el centroide se corresponde con el píxel más iluminado. En los dos casos el parámetro R toma el mismo valor, ya que la trayectoria seguida por el foco de luz es la misma para los tres modos. Para facilitar la visualización en las gráficas de los resultados obtenidos, se

ha optado por representar solo el modo que presenta mayor resolución, es decir, el modo continuo.

Es importante informar que en este procedimiento llevado a cabo en el laboratorio, tras la repetición exhaustiva de las medidas con las dos láminas diferentes, se optó por reportar los resultados obtenidos con la lámina de cobre con un diámetro de 0.1mm, debido a factores que impedían una toma de medidas de manera correcta. Por tanto, el valor de $R = 15$ píxeles, deduciendo que la resolución es $\pm 1,90^\circ$ cuando el sensor opera con/sin reset, y $\pm 3,81^\circ$ cuando asume que el centroide de la región iluminada son las coordenadas del primer fotodiodo que alcanza la tensión umbral del comparador.

Por otro lado, la resolución de la latitud se determina razonando de manera análoga al ángulo anterior, dando lugar que en este caso solo depende de la distancia focal (que puede variar debido a la lámina empleada como óptica) y del *pitch* del píxel (característica intrínseca del sensor, ya que es propio del diseño), tal y como se observa en la expresión (4.2.2).

$$\Delta\theta = \text{atan}\left(\frac{\text{pitch}}{FD}\right) \quad (4.2.2)$$

Con lo cual, como el *pitch* es $19,5 \mu m$, y la distancia focal empleando la lámina de cobre es $558 \mu m$, se tiene que la resolución de la latitud es igual para todos los modos de operación del sensor, y tiene un valor de $\pm 0,035^\circ$.

En la Figura 4.2.1 se observa el comportamiento del error cometido en la latitud empleando el modo con y sin reset es muy similar, estando dicho error dentro de la resolución, si se tienen en cuenta las medidas comprendidas en el FOV. Teóricamente, utilizando la expresión deducida (3.1.5), el campo de visión es $114,80^\circ$ (teniendo en cuenta que $R_{max} = \frac{\sqrt{2}}{2}L \cdot \text{pitch} = 882,5 \mu m$), que coincide con los resultados experimentales. En el caso en el que el centroide del Sol se moviera horizontalmente en el plano de la matriz de píxeles, el radio máximo no toma el valor anterior, sino que está dado por $R_{max} = \frac{L}{2}$, y como consecuencia, el campo de visión se reduce y en teoría es $FOV = 96,50^\circ$.

En cuanto al comportamiento del azimut, se aprecia que con el modo con reset, el sensor presenta menor error en el cómputo de dicho ángulo, estando comprendido (salvo en los extremos) dentro de la resolución. En cambio, el error operando en el modo continuo sin reset presenta dos regiones entre $40-80^\circ$ y entre $120-160^\circ$ con un error mayor, siendo su valor máximo absoluto de 5° .

Cabe resaltar que, se obtiene que las características estáticas del sensor de tipo octopus presenta mayor error en las tomas de medidas empleando el modo de operación TFS considerando simplemente el primer píxel iluminado.

Por último, es importante mencionar que la resolución se ha calculado solo teniendo en cuenta las posiciones geométricas de los píxeles iluminados para el cómputo del centroide de la región iluminada, sin embargo, se puede mejorar si además se consideran los niveles de iluminación. En este caso, si en cada medida se toma una imagen y se realiza una media ponderada de los píxeles multiplicando por $1/t$, siendo t el código que se tiene por píxel (tiempo que tarda el fotodiodo en alcanzar la tensión umbral del comparador), se alcanza una resolución subpíxel a costa de aumentar la latencia. Cabe recordar que $1/t$ se corresponde con el nivel de iluminación de cada píxel.

Para ilustrar este resultado, en la Figura 4.2.2 se muestran un mapa 2D y 3D de los niveles de iluminación de cada píxel que constituye la matriz de píxeles del sensor. Existe un pico de actividad en el centro de la región iluminada y un gradiente hacia los bordes,

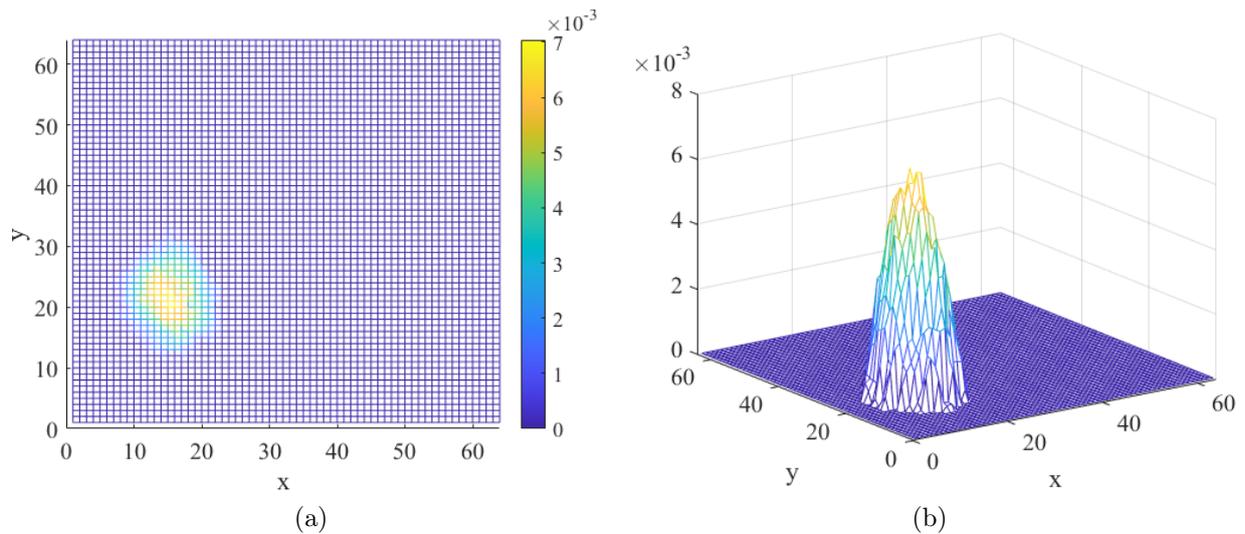


Figura 4.2.2: Respuesta del píxel cuando el sensor se expone a un foco de luz.

lo cual justifica el hecho de que se tome el píxel más iluminado como el centroide en uno de los modos de operación del sensor.

Si en el caso concreto de la imagen de la Figura 4.2.2 se calcula el centro de la región iluminada considerando solo las posiciones geométricas de los píxeles iluminados, empleando el algoritmo descrito en la sección 3.4.1, resulta que la resolución es 0,5 píxeles y las coordenadas del centroide son $(x_c, y_c) = (14.0, 21.0)$. En cambio, si se determina el centroide teniendo en cuenta además los niveles de iluminación de los píxeles, resulta que la resolución aumenta notablemente y las coordenadas del centroide de la ROI son $(x_c, y_c) = (14.1218, 20.4039)$. Por tanto, se llega a que dependiendo de la resolución que se necesite para la aplicación que esté orientada el sensor, se puede tener una medida gruesa y rápida (teniendo en cuenta solo las posiciones geométricas de los píxeles iluminados) y una medida fina a coste de aumentar el tiempo de respuesta (considerando además los niveles de iluminación de los píxeles).

4.2.1. Influencia del número de píxeles considerados para el cálculo del centroide

Con el fin de estudiar cómo influye en el cómputo del centroide de la región iluminada, cuando el sensor de tipo octopus está operando en el modo con/sin reset, el número de píxeles iluminados que se tienen en cuenta, se realiza el siguiente experimento: se toma como referencia el valor del centroide cuando se consideran todos los píxeles iluminados para la determinación del centro del área y se calcula el error en cada iteración teniendo en cuenta un número diferente de píxeles. En la primera iteración solo se considera el píxel cuyo fotodiodo presenta una tensión V_{oc} superior a la tensión umbral del comparador, y en cada iteración posterior, se añade al área para el cálculo del centroide, el próximo píxel más iluminado.

En la Figura 4.2.3 se representa el error de la posición del centroide en cada iteración con respecto a la referencia en función del número de píxeles iluminados considerados. El número total de píxeles iluminados es 245, pero el estudio se realiza con los píxeles que presentan niveles de iluminación distintos, que se corresponden con 204 píxeles en el

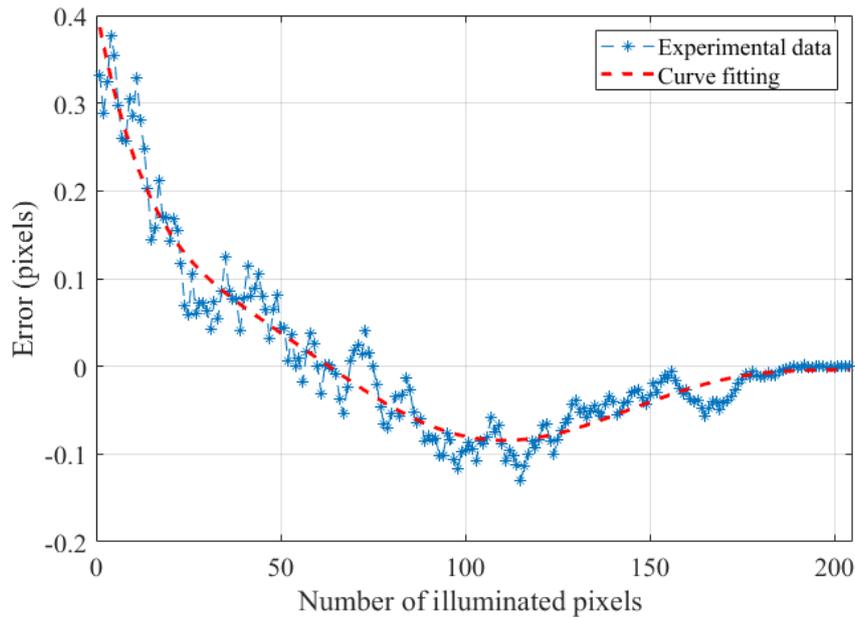


Figura 4.2.3: Error absoluto cometido en el cómputo del centroide de la región iluminada en función del número de píxeles iluminados que se consideran. La referencia es el centroide considerando todo el área.

caso de estudio. Asimismo, se ha realizado un ajuste no-lineal de los datos experimentales mediante un polinomio de orden 7, representado mediante líneas discontinuas rojas en la Figura 4.2.3.

Como resultado, se llega a que según se aprecia en la gráfica, no es necesario considerar todos los píxeles iluminados, ya que el error alcanza un valor estacionario nulo al tener en cuenta unos 180/204 píxeles iluminados, es decir, aproximadamente un 88 % de los fotodiodos que se encuentran midiendo niveles distintos de iluminación.

4.3. Características estáticas del sensor continuo

Con el propósito de obtener los resultados de la calibración del sensor solar continuo, se procede de forma análoga al procedimiento llevado a cabo con el sensor octopus. La única diferencia es que en este caso, aunque presente dos modos de operación distintos, la información proporcionada del centroide de la región iluminada es la misma. Como consecuencia, no se va a diferenciar en la presentación de los resultados los dos modos de operación.

En la Figura 4.3.1 se muestran los resultados de las características estáticas del sensor, la representación de la latitud y azimut experimental frente a la teórica, así como el error de la medida en cada uno de los casos. De nuevo, las líneas discontinuas en horizontal negras se corresponden con la resolución. Obsérvese que para este sensor se reporta en la misma gráfica los resultados empleando los dos tipos de láminas, con orificios de diferentes diámetros. En este caso, para el azimut, la única variación posible del centroide es de un píxel, es decir, $\Delta y = 1$, y por ello, $\Delta\phi = \text{atan}(1/R)$; dando lugar que la resolución es $\Delta\phi = \pm 3,81^\circ$ (para $R = 15$ píxeles).

Por otro lado, la resolución de la latitud se calcula empleando la expresión 4.2.2, siendo diferente la distancia focal para cada una de las láminas utilizadas, cuyo valor se

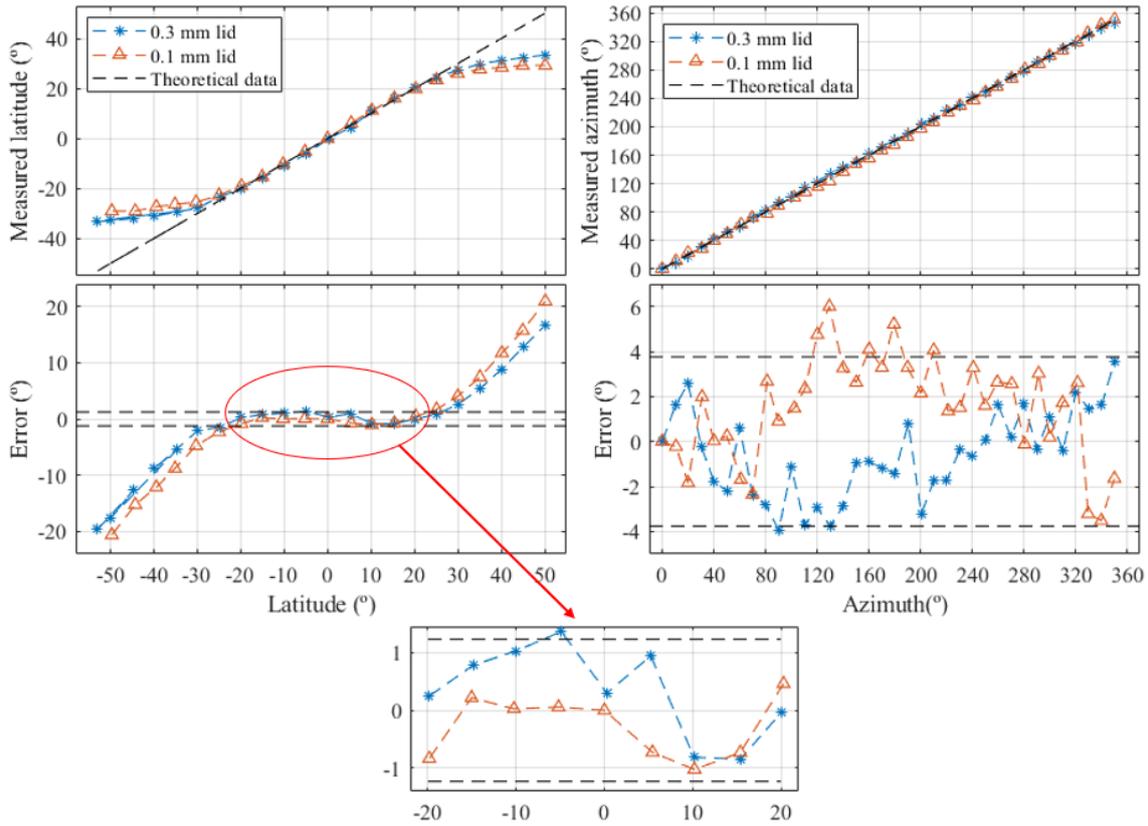


Figura 4.3.1: Representación gráfica de las medidas experimentales de los ángulos que determinan la posición del Sol, latitud a la izquierda y azimut a la derecha, en función de sus valores teóricos. Las gráficas inferiores se corresponden con el error cometido en la medición en cada ángulo en función del valor teórico.

muestra en la Tabla 4.1. Procediendo igual que para el sensor octopus, solo se representa la resolución mayor en la gráfica, que se corresponde con los resultados utilizando la lámina de aluminio al tener una distancia focal menor, y como consecuencia mayor resolución, siendo ésta $\Delta\theta = \pm 1,23^\circ$.

En cuanto al rango de visión del presente sensor solar, teóricamente se calcula empleando la expresión (3.1.5), que como depende de la distancia focal, es diferente para cada una de las láminas utilizadas para la medición de los ángulos (el valor del radio máximo es el mismo que el deducido para el sensor octopus). Para la lámina de aluminio, con $FD_{Al} = 906 \mu m$, la $FOV_{Al} = 88.49^\circ$; mientras que para la lámina de cobre con $FD_{Cu} = 906 \mu m$, la $FOV_{Cu} = 82.40^\circ$. Ésta última presenta un menor campo de visión debido a que tiene una mayor distancia focal. En ambos casos los resultados experimentales coinciden con los teóricos, tal y como se observa en la Figura 4.3.1. Cuando el centroide de la luz solar se mueve en horizontal, el radio máximo se reduce a $L/2$, y el campo de visión disminuye, siendo en cada caso, $FOV_{Al} = 69.11^\circ$ y $FOV_{Cu} = 63.52^\circ$.

Por otra parte, si se observa la Figura 4.3.1, resulta que el error cometido en la medición de la latitud se encuentra dentro del rango de la resolución, mientras que para el azimut, utilizando la lámina de aluminio está dentro, sin embargo, para ciertos ángulos con la lámina de cobre no, llegando a cometer una incertidumbre en la medida de hasta 6° .

A diferencia del sensor octopus, en el sensor de operación continua no se pueden tener en cuenta los niveles de iluminación de los píxeles iluminados para mejorar la resolución

en el cálculo del centroide de la ROI, puesto que la lógica circuital que se encarga del cómputo del centroide solo emplea las posiciones geométricas. Sin embargo, si se incluye un modo de lectura Time-to-First-Spike (TFS), que es compatible con la arquitectura del píxel, es posible conseguir resoluciones subpíxel.

Para finalizar, a modo de esquema comparativo de las características estáticas de ambos prototipos de sensores solares, se muestran las especificaciones de cada uno en la siguiente Tabla 4.2. Como resultado se tiene que, el sensor solar de tipo octopus presenta mayor Campo de Visión (FOV) y mayor resolución en los ángulos. Es importante resaltar que en la toma de medidas con ambos sensores están presentes diferentes factores que alteran los resultados obtenidos. Algunos de ellos son el tipo de cubierta como óptica empleada, la forma del orificio y las condiciones del montaje e iluminación, entre otras.

Tabla 4.2: Tabla comparativa de las características estáticas de los dos prototipos de sensores solares estudiados. Se presentan los resultados con el modo con el que mejor resultados se obtienen.

	FOV	$\Delta\theta$	$\Delta\phi$
Sensor solar octopus	115°	0,035°	1,90°
Sensor solar continuo	88,67°	1,24°	3,81°

4.4. Exactitud y precisión

El experimento llevado a cabo para determinar la dispersión en las medidas consiste en tomar un número elevado de muestras de las coordenadas del centroide del foco de luz (x_c, y_c) recorriendo una trayectoria circular, empleando el mismo *setup* experimental que para la calibración del azimut (Figura 4.1.1b). Nótese que se han recorrido los 360° varias veces hasta conseguir el número determinado de muestras establecido. Como idealmente la latitud se mantiene constante a lo largo de todo el desplazamiento seguido por la bombilla, además de analizar la dispersión del centroide, se observa la variación de la latitud.

Por otro lado, con el fin de obtener la precisión en las medidas de la latitud y azimut, se ha optado por ajustar los datos experimentales a una curva de mejor ajuste a los valores teóricos, reduciendo de este modo el error cuadrático medio (RMSE).

4.4.1. Exactitud y precisión del sensor octopus

En la Figura 4.4.1 se muestran los resultados obtenidos para el sensor de tipo octopus empleando los tres modos de operación, tomando 10^4 muestras en cada caso. La representación de las coordenadas del centroide a lo largo de la trayectoria se ilustra en la Figura 4.4.1a, donde las líneas discontinuas acotan el rango donde se encuentran el 95 % de las muestras (x_c, y_c) , es decir, se corresponden con las curvas dadas por (4.4.1); siendo σ la desviación típica del array del radio del centroide empleando una distribución normal, θ el ángulo recorrido, y R , el radio de la trayectoria.

$$(x, y) = R \pm 1,65 \cdot \sigma \cdot (\cos\theta, \sin\theta), \quad \theta \in [0, 360^\circ] \quad (4.4.1)$$

Obsérvese la gran dispersión de las coordenadas del centroide de la luz procedente de la bombilla empleando el modo TFS, considerando solo el primer píxel que transmite el

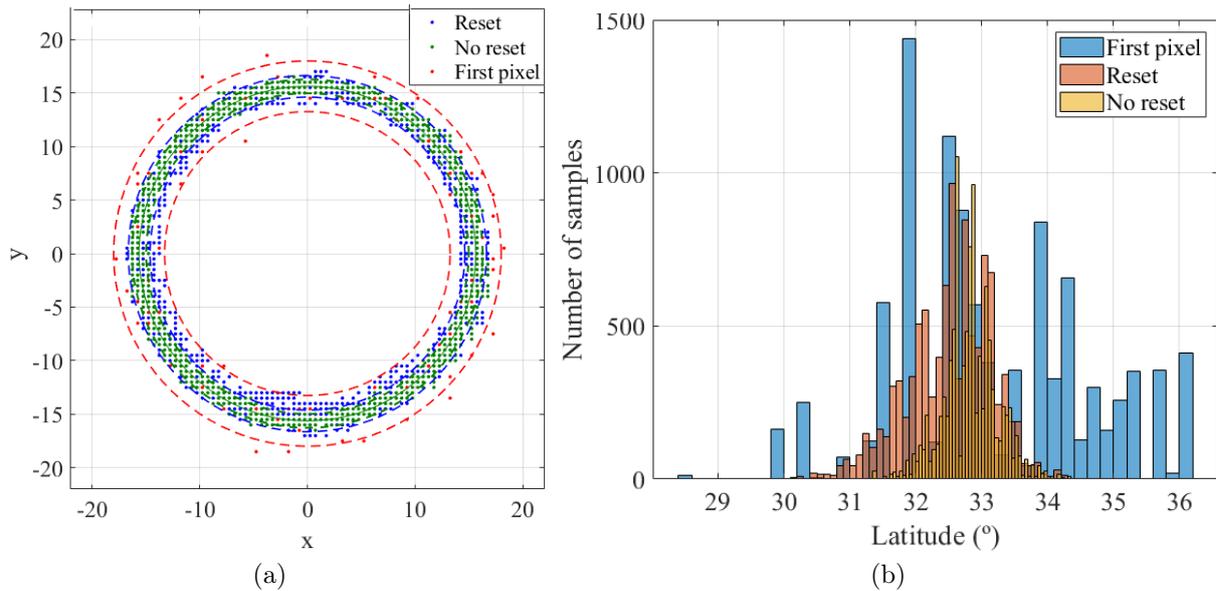


Figura 4.4.1: (a) Representación de las coordenadas del centroide a lo largo de la trayectoria para los tres modos de operación. El color azul representa el modo continuo con reset, el verde sin reset y el rojo el modo TFS. (b) Histograma de la latitud medida a lo largo de la trayectoria circular. Azul indica el modo TFS, naranja con reset, y amarillo sin reset.

pulso, que incluso no se consigue distinguir una curva uniforme al representar los puntos medidos. En este caso, un 87,80% de los puntos se encuentran en la región $[\mu(R) - 1,65\sigma, \mu(R) + 1,65\sigma]$. En cambio, con los otros dos modos de operación la variación no es tan significativa, estando el 90,40% de las muestras dentro de la región operando en el modo con reset, y un 89,59% en el modo sin reset.

Para analizar cuantitativamente los resultados obtenidos, en la Tabla 4.3 se recogen los valores medios del radio, μ , la desviación típica absoluta, σ , y relativa σ/μ . Como

Tabla 4.3: Tabla comparativa dispersión en las medidas con los diferentes modos de operación del sensor octopus.

Modo de operación	μ (píxeles)	σ (píxeles)	σ/μ (%)
Primer píxel	16,14	1,43	8,86
Sin reset	15,77	0,61	3,87
Con reset	15,48	0,39	2,52

resultado, se llega a que con el sensor operando con el TFS con reset presenta una menor variabilidad en sus medidas. En la Figura 4.4.1b se muestran los histogramas obtenidos del valor de la latitud medido en cada punto de la trayectoria, que idealmente se debe mantener constante. Las medidas en los modos con y sin reset siguen una distribución normal $N(32.51, 0.65)$ y $N(32.82, 0.41)$, respectivamente; sin embargo, el comportamiento del ángulo operando en el modo TFS, considerando el primer píxel, no está bien definido.

Por otra parte, la precisión del sensor en la medición de la latitud y azimut se determina a partir de los resultados de la calibración mostrados en la Figura 4.2.1. Para ello, se han ajustado los datos experimentales, para cada modo de operación, a los datos teóricos

empleando una curva de mejor ajuste. De esta forma, se consigue minimizar el error, ya que es posible obtener el valor del ángulo correspondiente calibrado introduciendo el dato medido en una función polinómica dada por (4.4.2); donde N es el orden del polinomio óptimo, β_{cal} es el ángulo calibrado y, β_{med} , el ángulo medido.

$$\beta_{cal} = a_N \cdot (\beta_{med})^N + a_{N-1} \cdot (\beta_{med})^{N-1} + a_{N-2} \cdot (\beta_{med})^{N-2} + \dots + a_0 \quad (4.4.2)$$

En la Tabla 4.4 se reportan los errores cuadráticos medios, σ , de las coordenadas del Sol (*latitud, azimuth*), operando el sensor con los tres modos de operación, así como el grado del polinomio de la curva de mejor ajuste, N , y el valor de la precisión dada por 3σ teniendo en cuenta una distribución normal. Además, se recoge el máximo error relativo, ϵ , de la medida tras la calibración. Nótese que el ajuste para la latitud se ha realizado dentro del FOV, puesto que no es de interés minimizar el error fuera del campo de visión.

Tabla 4.4: Resultados precisión sensor octopus.

Modo operación		N	RMSE, σ (°)	Precisión, 3σ (°)	Máx. error rel. ϵ (%)
Primer píxel	Latitud	7	1,47	4,41	48,6
	Azimut	9	2,80	8,40	27,8
Sin reset	Latitud	7	0,36	1,08	5,9
	Azimut	9	0,81	2,43	4,8
Con reset	Latitud	7	0,10	0,30	3,1
	Azimut	9	0,49	1,47	1,6

Como conclusión, se llega a que si la señal *reset* del sensor solar está habilitada, se obtiene mayor precisión en la medición de la posición solar, siendo $0,30^\circ$ para la latitud y, $1,47^\circ$ para el azimuth. Además, se consigue un error relativo máximo del 3,1 % y 1,6 % para la latitud y azimuth, respectivamente.

4.4.2. Exactitud y precisión del sensor continuo

El estudio de la dispersión de las medidas y de la precisión del sensor continuo se realiza de forma análoga al método empleado para el sensor octopus. En la Figura 4.4.2a, donde las líneas discontinuas se corresponden con las curvas dadas por (4.4.1), se ilustra la dispersión de las 10^4 muestras tomadas del centroide del foco de luz (x_c, y_c). El 87,6 % de los puntos están comprendidos en la región limitada por $[\mu(R) - 1,65\sigma, \mu(R) + 1,65\sigma]$, donde μ es la media del radio del centroide y σ la desviación estándar. En la tabla 4.5 se reportan las propiedades de la distribución que presenta la dispersión de los datos.

En la Figura 4.4.2b se muestra el histograma de la latitud, que presenta una distribución normal $N(31.42, 0.49)$. Obsérvese que la dispersión de los datos es menor si se compara con el sensor octopus.

Tabla 4.5: Estudio de la dispersión de las medidas empleando el sensor de operación continuo.

Media, μ (píxeles)	Desv. estándar σ (píxeles)	Coef. variación σ/μ (%)
15,55	0,49	3,17

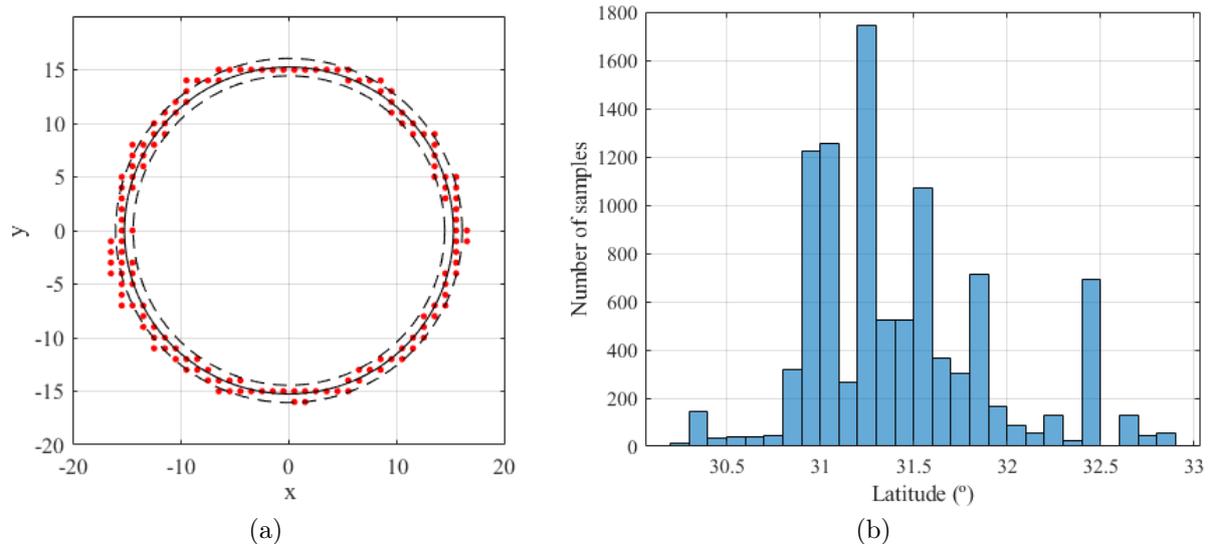


Figura 4.4.2: (a) Representación de las medidas de las coordenadas del centroide a lo largo de la trayectoria (b) Histograma de la latitud medida a lo largo de la trayectoria circular.

Por otro lado, la precisión del sensor se calcula de la misma forma que para el sensor octopus. Se ha realizado un ajuste de los datos experimentales (proporcionados por el dispositivo) mediante una curva, con el fin de obtener la posición del Sol (*latitud, azimut*) calibrada; empleando una función polinómica de la forma dada por (4.4.2). En la Tabla 4.6 se reportan las especificaciones de interés, como son el orden del polinomio de mejor ajuste (N), el error cuadrático medio (σ), la precisión (3σ) y el máximo error relativo (ϵ) de la latitud y azimut tras la calibración.

Tabla 4.6: Resultados precisión sensor continuo.

Ángulo	N	RMSE, σ (°)	Precisión, 3σ (°)	Error rel. abs. ϵ (%)
Latitud	7	0,26	0,78	8
Azimut	5	1.11	3.33	9

4.5. Consumo de corriente

Los sensores solares que se caracterizan en este trabajo están diseñados para funcionar consumiendo bajos valores de energía, ya que los fotodiodos operan como celdas solares, generando de esta forma energía. En esta sección se analiza el consumo de corriente de los dos prototipos ante diferentes condiciones para comprobar cuales son las principales fuentes que disipan energía.

Una de las principales fuentes de consumo en ambos sensores son los comparadores de la matriz de píxeles, con aproximadamente $20 \mu\text{A}$ de consumo estático, es decir, $4,88 \text{ nA}$ por píxel (64×64 píxeles en el array). A continuación, se analiza individualmente el origen del consumo de corriente de los dos sensores.

4.5.1. Consumo de corriente del sensor octopus

En la Figura 4.5.1 se representa el consumo medio de corriente del sensor en función del número de frames por segundo, cubriendo la matriz de píxeles con la lámina dedicada y sin ella. La tasa equivalente de frames se define como la inversa de la frecuencia media de disparo de los píxeles activos. Además del consumo estático del comparador, otra de las fuentes es la circuitería digital de la periferia proveniente de las líneas de pull-up, ya que los transistores correspondientes las ponen a nivel bajo cada vez que se produce un pulso de un píxel (cuando $V_{oc} > V_{th}$).

Obsérvese que la relación entre el consumo de corriente y el número de frames por segundo es lineal si el sensor está iluminado, existiendo un consumo estático que no cambia debido a las fugas de los transistores en corte cuando la matriz de píxeles está oscura; es decir, la gráfica debe tener un codo hacia la izquierda para tasas de 0 frames/s.

Por otro lado, como consecuencia de estar operando más comparadores y por ello, más líneas de pull-up pasan a nivel bajo, cuando están iluminados todos los píxeles de la matriz (4096 píxeles), el consumo es de aproximadamente un orden de magnitud mayor frente al caso que están iluminados 290 píxeles, cuando el chip contiene la cubierta con el orificio. Sin embargo, cabe resaltar que para la aplicación que está orientada este sensor (determinación y ajuste de actitud), en ningún momento van a estar funcionando al mismo tiempo todos los comparadores del array de píxeles.

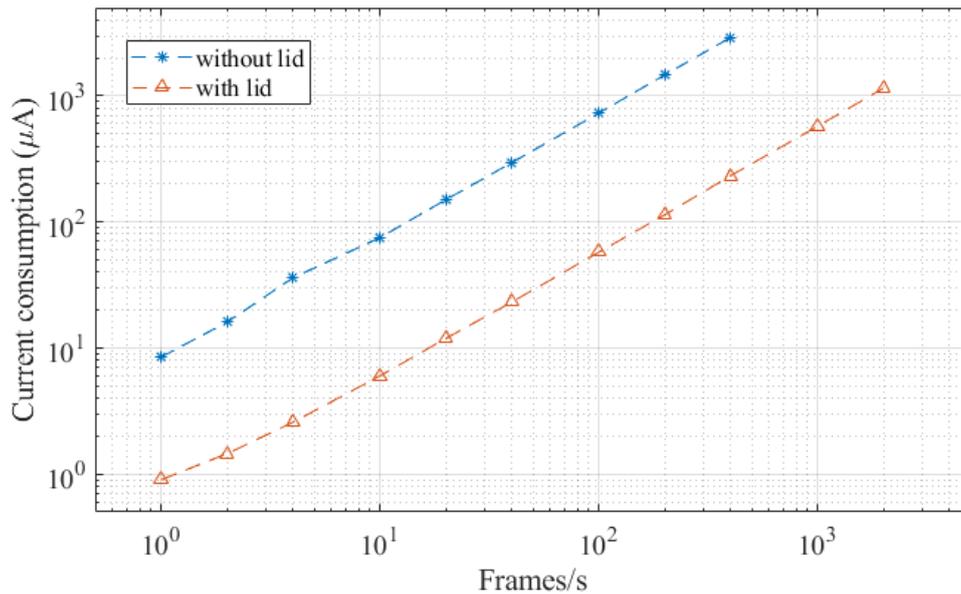


Figura 4.5.1: Consumo de corriente del sensor octopus en función del número de frames por segundo.

4.5.2. Consumo de corriente del sensor continuo

Las otras dos fuentes principales de consumo de corriente del sensor continuo, además del comparador, son los circuitos de la periferia (líneas de pull-up) y la circuitería digital que calcula el centroide de la región iluminada. En la Figura 4.5.2a se representa el consumo medio de corriente en función del número de frames por segundo para un tiempo de integración de $1 \mu s$, cuando está iluminada toda la matriz de píxeles y cuando está cubierta por los dos tipos de láminas de tipo pin-hole. Cabe aclarar que la frecuencia equivalente

de frames es el tiempo que tarda en calcularse el centroide de la región iluminada.

Existe un consumo estático predominante de aproximadamente $4 \mu\text{A}$ para las tres situaciones, mientras que para tasas altas de frames, la corriente media aumenta de forma lineal y se aprecia que el consumo es mayor cuanto mayor es el área de la matriz de píxeles iluminada. Nótese que el consumo de corriente del sensor continuo es tres órdenes de magnitud menor que la disipada por el sensor octopus.

Asimismo, en la Figura 4.5.2b se representa el consumo medio de corriente en función del tiempo de integración para tres frecuencias de frames diferentes. Cabe recordar que el tiempo de integración se define como el tiempo desde que el fotodiodo se ha reseteado (inicia la operación de sensado) hasta que el comparador cambia de estado (el píxel manda el pulso al exterior). Cuanto mayor es la tasa de frames y el tiempo de integración, mayor es el consumo de corriente.

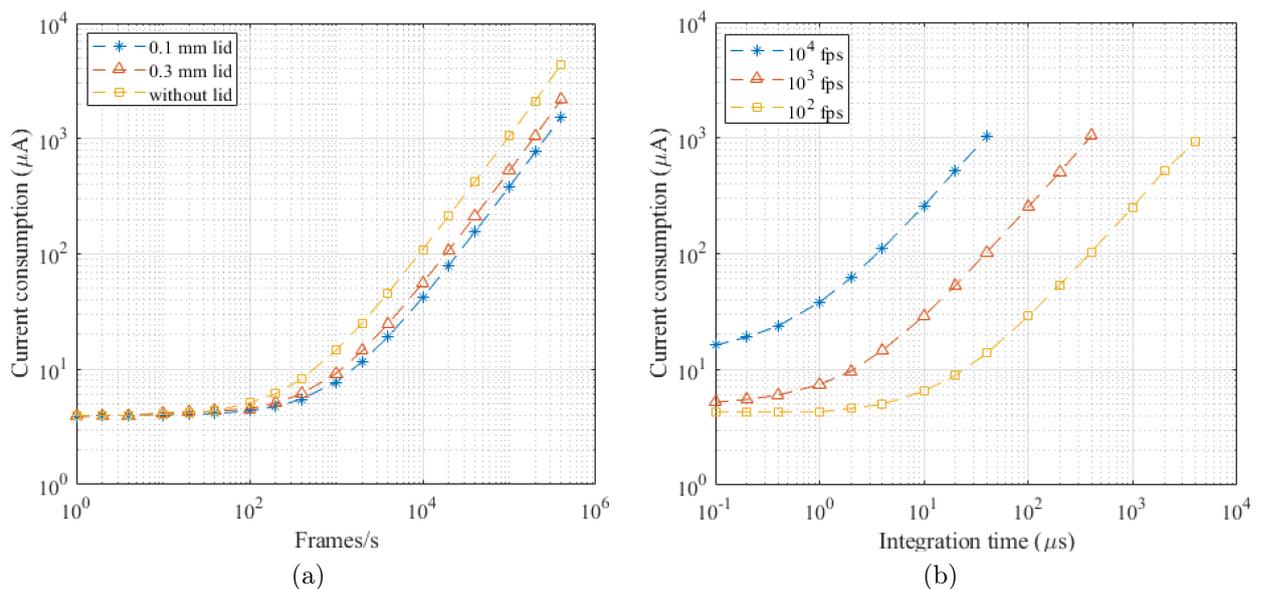


Figura 4.5.2: Consumo de corriente del sensor continuo (a) en función del número de frames por segundo, y (b) en función del tiempo de integración.

4.6. Resolución temporal

La resolución temporal se define como la variación temporal más rápida de iluminación que el sensor puede detectar. Con lo cual, para estudiar esta característica se ha utilizado un láser pulsado para iluminar al chip con diferentes frecuencias y con ello, analizar la capacidad que presenta el sensor de captar cuando está iluminado y cuando no para diferentes valores de la tensión umbral del comparador.

Otro de los experimentos llevado a cabo en el laboratorio es el estudio de si el sensor es capaz de seguir la trayectoria recorrida por la fuente de luz. Para ello, con la bombilla que emula la luz solar, se ha trazado dos trayectorias distintas, una diagonal a través de la matriz de píxeles, y otra circular. En las siguientes secciones se presentan los resultados obtenidos de cada sensor solar.

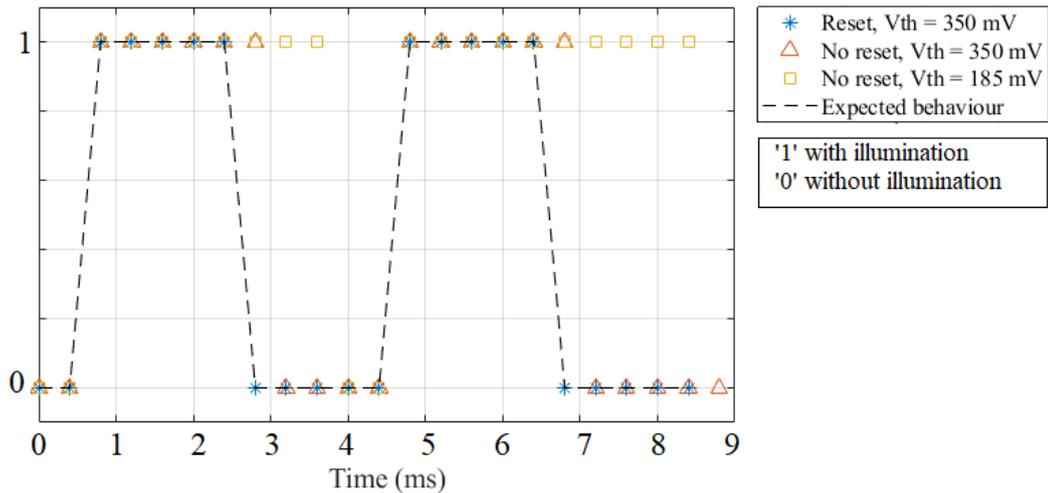


Figura 4.6.1: Seguimiento del parpadeo del láser a una frecuencia de 200 Hz.

4.6.1. Resolución temporal del sensor octopus

Para el sensor octopus el láser pulsado presenta una frecuencia de 200 Hz y la tasa de frames establecida es de 2000 fps. En la Figura 4.6.1, donde el valor ‘1’ indica que la matriz de píxeles está iluminada, y ‘0’, ausencia de iluminación, se ilustra para diferentes valores de la tensión umbral del comparador si el sensor es capaz de detectar el comportamiento del láser pulsado. Se tiene que con el sensor funcionando en el modo con reset estableciendo una tensión umbral de 350 mV es capaz de seguir el pulsado del láser, es decir, detecta cuando está encendido y apagado.

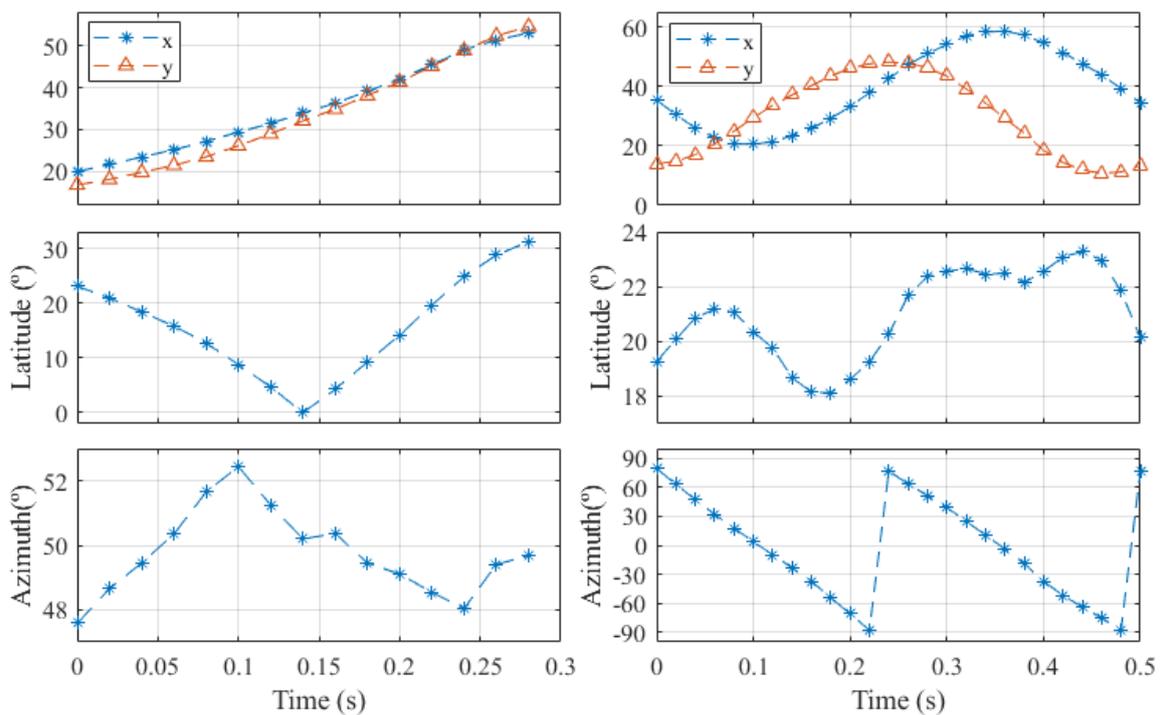


Figura 4.6.2: Representación de las medidas correspondientes a la trayectorias seguidas por el foco de luz; diagonal (izquierda) y circular (derecha), junto con la latitud y azimut correspondiente a cada punto empleando el sensor octopus.

En cambio, operando en modo continuo sin reset, los fotodiodos no son capaces de detectar cuando el láser esta apagado. Esto es debido a que las capacidades parásitas de los fotodiodos no se han terminado de descargar y aparece un efecto memoria, manifestando una captación de iluminación cuando el láser está apagado. Esto puede ser debido a que cuando los diodos no están iluminados, la única corriente que circula por ellos es $-I_o$ (corriente inversa de saturación), que es muy pequeña y descarga muy lentamente la capacidad parásita. Este fenómeno se estudia con más detalle en la siguiente sección para el sensor continuo. Nótese que este efecto memoria no tiene lugar en el modo TFS puesto que los fotodiodos se resetean antes de comenzar su operación de sensado.

Por otro lado, en la Figura 4.6.2 se representa la trayectoria diagonal y circular seguida por la bombilla, así como la latitud y azimut correspondiente a cada punto. Se tiene que el sensor es capaz de realizar un seguimiento a lo largo del tiempo de la trayectoria seguida por la fuente de luz.

4.6.2. Resolución temporal del sensor continuo

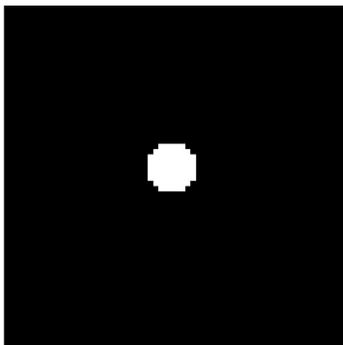
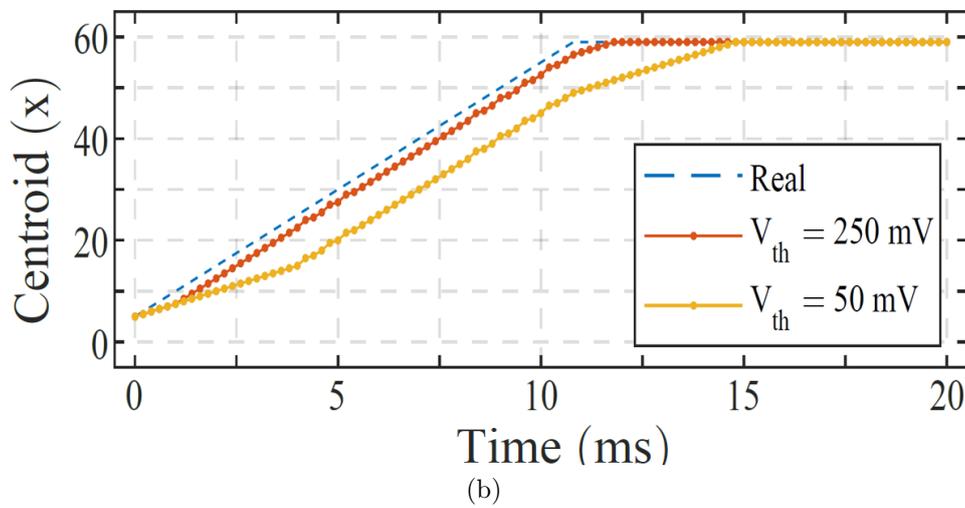
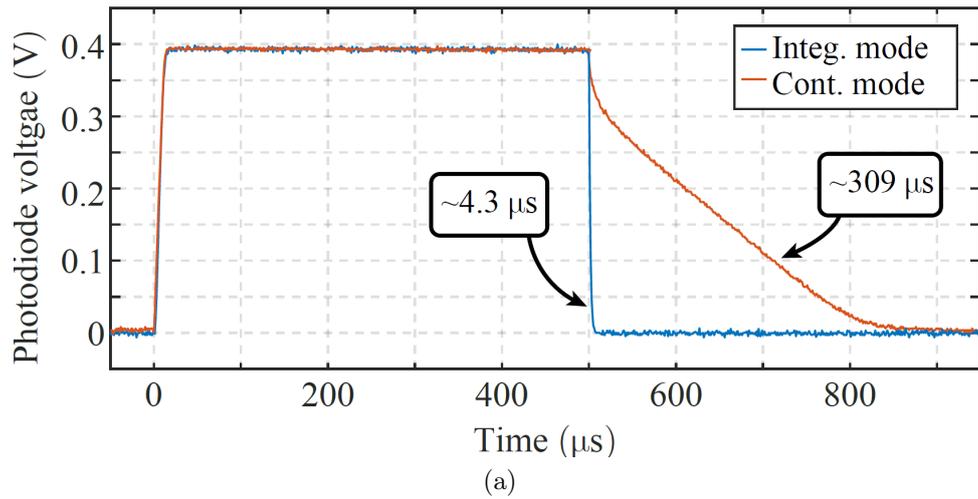
Como se ha mencionado anteriormente, un resultado interesante es que cuando los píxeles de la matriz del sensor dejan de sentir iluminación ante la presencia de oscuridad, los fotodiodos comienzan a descargarse. Lo que ocurre es que idealmente el tiempo de carga y de descarga son iguales, sin embargo, en la práctica esto no es así, el tiempo que tarda en descargarse es mayor que el que tarda en cargarse, ya que aparece un efecto memoria.

Para ilustrar este efecto, en la Figura 4.6.3a se muestra la tensión del fotodiodo a lo largo del tiempo cuando está iluminado por un láser pulsado con una frecuencia de 1kHz.

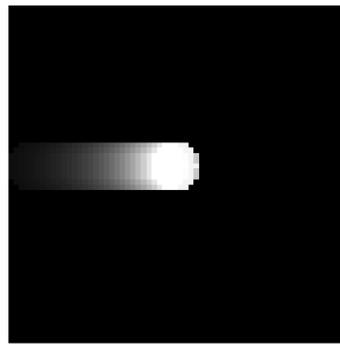
Obsérvese que en modo continuo del sensor, cuando la matriz de píxeles está en ausencia de iluminación, el tiempo de descarga del fotodiodo es $309 \mu s$. Una forma de estudiar este fenómeno es considerar los fotodiodos como un sistema de primer orden con diversas constante de tiempo de subida y de bajada, cuyo resultado se ilustra en las Figuras 4.6.3c y d. Estas dos imágenes representan las tensiones ideal y real del fotodiodo, respectivamente, cuando el foco de luz (láser) se mueve horizontalmente a una velocidad de 5000 píxeles/s; donde los píxeles blancos representan los iluminados ($V_{oc} = 440mV$), y los negros, los fotodiodos que tienen una tensión V_{oc} nula.

Debido al elevado tiempo que tardan en descargarse los fotodiodos iluminados, aparece una estela luminosa, que resulta un efecto memoria, el cual puede atenuarse modificando la tensión umbral del comparador. En la Figura 4.6.3e se muestra las tensiones de los fotodiodos que superan una tensión $V_{th} = 250mV$. En esta situación el efecto memoria se reduce, ya que al ser la tensión umbral menor, tarda menos tiempo en descargarse los fotodiodos. Nótese que aunque este estudio se ha realiza con el sensor continuo, es aplicable este efecto al sensor octopus operando en el modo continuo sin reset.

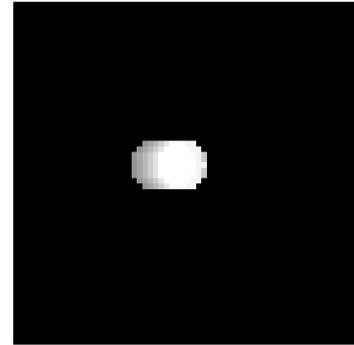
Por otro lado, en la Figura 4.6.3b se representa el centroide del área iluminada de la matriz de píxeles frente al tiempo, para diferentes valores de tensiones umbrales V_{th} . Para el caso de $V_{th} = 250mV$ se observa que el error respecto al valor del centroide real es de pocos píxeles en el estado transitorio, mientras que para $V_{th} = 50mV$, el error es más notorio, alcanzando el error casi la decena de píxeles. Sin embargo, lo interesante es que a pesar de la existencia de este efecto, es posible seguir la trayectoria del foco de luz deseado.



(c)



(d)



(e)

Figura 4.6.3: (a) Tensión del fotodiodo a lo largo del tiempo, donde se observa el tiempo que tarda en descargarse el fotodiodo operando en el modo continuo. (b) Centroide de la región iluminada a lo largo del tiempo con diferentes tensiones umbrales. (c) Imagen ideal. (d) Imagen en movimiento ilustrando la estela luminosa. (e) Resultados simulación al cambiar V_{th} .

Por último, en la Figura 4.6.4 se representa las medidas de las trayectoria diagonal y circular seguida por la bombilla, así como la latitud y azimut correspondiente a cada punto. Obsérvese que el sensor continuo tiene la capacidad de seguir las trayectorias

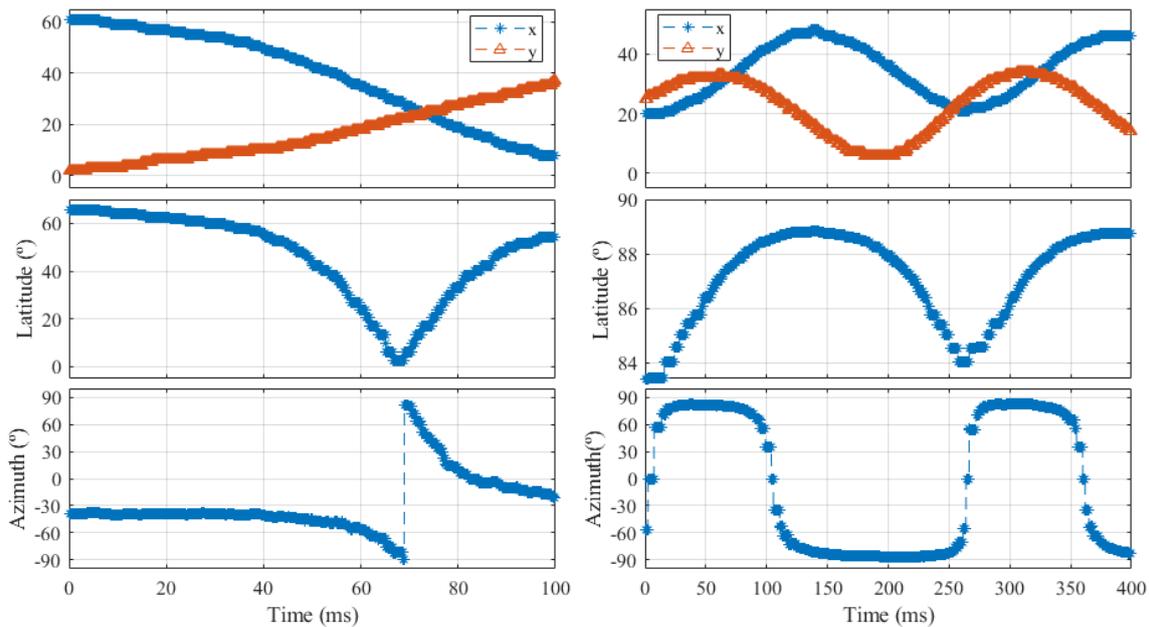


Figura 4.6.4: Representación de las medidas de las trayectorias diagonal (izquierda) y circular (derecha) seguida por la bombilla, junto con la latitud y azimut correspondiente a cada punto empleando el sensor de operación continua.

recorridas por la fuente de luz.

4.7. Sensibilidad del fotodiodo y dependencia de V_{oc} con la iluminación

La tensión de circuito abierto (V_{oc}), cuya expresión está dada por (2.1.3), presenta una dependencia logarítmica con la corriente fotogenerada. Por tanto, en esta sección se analiza la dependencia de la tensión V_{oc} del fotodiodo con la iluminación. Nótese que este análisis es común para los dos prototipos de sensores, ya que el fotodiodo empleado en la matriz de píxeles es igual en ambos, DNW/PWELL y PWELL/NDIFF conectados en paralelo al estar el DNW cortocircuitado a tierra con el sustrato de tipo p (sección 3.2).

Para realizar el estudio y medir el parámetro V_{oc} para diferentes niveles de iluminación, se han empleado los diversos instrumentos de laboratorio mostrados en la Figura 4.7.1 [21]. Se dispone de una lámpara halógena para iluminar al chip, filtros de densidad colocados entre la fuente de luz y el chip para atenuar la luz incidente, un divisor de haz (*beam splitter*), y un termómetro para controlar que en todo momento se esté midiendo a una temperatura de 30°C. Mantener la temperatura constante durante todo el experimento, garantiza evitar fluctuaciones de las corrientes específicas en cada caso.

En la Figura 4.7.2 se muestra la sensibilidad del fotodiodo y la tensión de circuito abierto frente a diferentes niveles de iluminación. En concreto se han barrido 4 décadas, y se observa que a medida que aumenta la iluminación, mayor es la tensión de circuito abierto del fotodiodo, como consecuencia de que se están generando más pares electrón-hueco en la unión PN. Bajo condiciones típicas de iluminación en entornos interiores, V_{oc} oscila entre 300 mV y 400 mV, mientras que en días soleados los valores típicos oscilan entre 410 mV y 500 mV, tendiendo a cero para bajos niveles de iluminación [21].

Por otro lado, la fuente de luz de interés de los sensores solares caracterizados en este

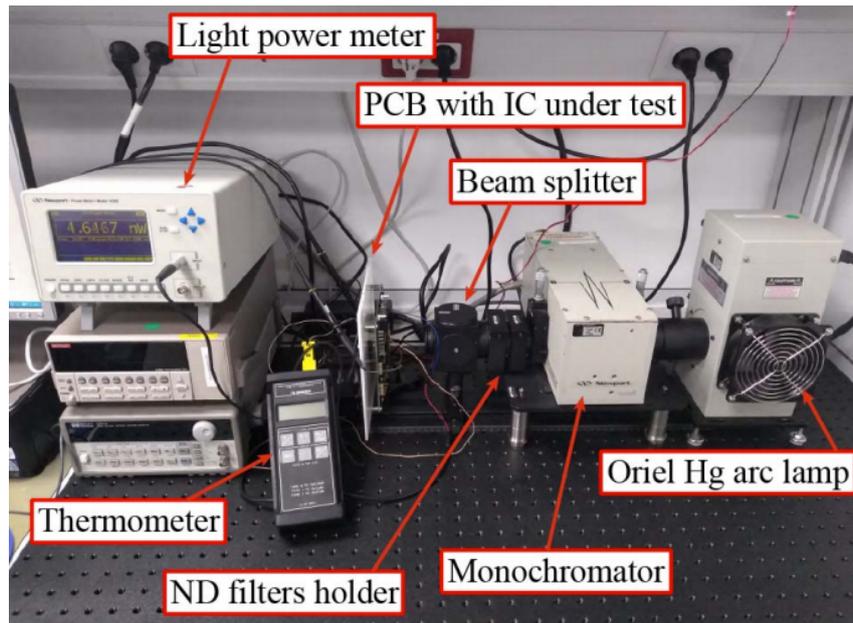


Figura 4.7.1: Septup experimental para la caracterización de la sensibilidad del fotodiodo.

trabajo es el Sol, el cual presenta un nivel de iluminación de aproximadamente 93 lux por watio de potencia electromagnética [19], es decir, en torno a 100 klux por metro cuadrado en la superficie de la Tierra. Obsérvese que este fotodiodo fabricado en silicio, es adecuado para la detección de la luz solar, ya que incluso en el espacio, la radiación que llega a los satélites proveniente del Sol es de aproximadamente 120-140 klux, dando lugar a que el

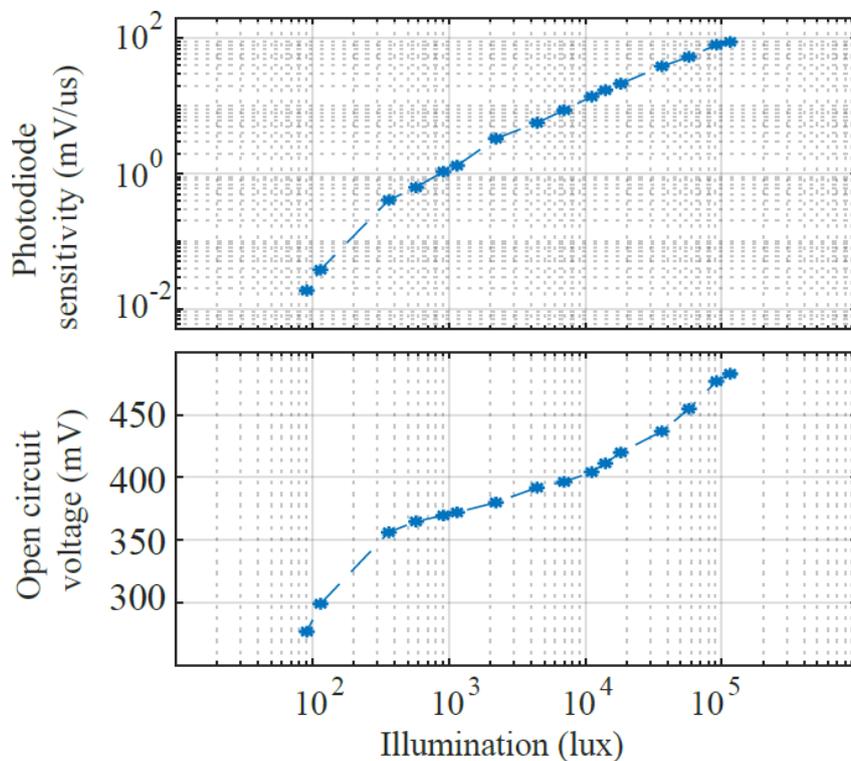


Figura 4.7.2: Sensibilidad del fotodiodo (superior) y tensión de circuito abierto (inferior) en función de la iluminación.

fotodiodo presenta una sensibilidad de $10 \text{ mV}/\mu\text{s}$ y alcanza una tensión V_{oc} de 440 mV .

Sin embargo, hay que tener en cuenta que parte de la iluminación que llega a los satélites que tienen incorporados los sensores solares, ya sea para la determinación de actitud o para recolección de energía, es debido al efecto albedo, puesto que la Tierra refleja aproximadamente un tercio de la luz solar que incide sobre ella [19, 46]. La iluminación causada por este efecto depende de las condiciones climáticas de la Tierra, ya que por ejemplo, el hielo marino cubierto de nieve fresca refleja un 85 % de la luz solar incidente, pero en cambio, las aguas abiertas del océano Ártico tan solo un 7 %.

4.8. Tiempo de respuesta

A continuación, se analiza el tiempo de repuesta de los dos tipos de sensores solares dependiendo en el modo que estén operando. El tiempo de respuesta o latencia se define es el tiempo de reacción a un cambio instantáneo de iluminación.

4.8.1. Latencia del sensor octopus

En el modo *Time-to-First Spike* (TFS) del sensor octopus la latencia está limitada por el tiempo de integración que se establece para que los fotodiodos alcancen la tensión umbral del comparador. Como una vez que se produce el pulso indicando que el píxel está iluminado, hay que leer sus coordenadas, es necesario considerar además el tiempo de lectura de los píxeles. Sin embargo, como es inferior a $1 \mu\text{s}$, y el tiempo de integración es bastante mayor, el tiempo de lectura de la matriz de píxeles no limita la latencia del sensor.

La frecuencia de frames (FPS) equivalente se puede definir como la inversa de la latencia del sensor, con lo cual, a partir de la curva de la sensibilidad del fotodiodo de la Figura 4.7.2 se puede extrapolar el tiempo que tarda en alcanzar una determinada tensión umbral, y luego determinar el máximo frame rate que se puede alcanzar para una iluminación dada. Para un nivel de iluminación de 10 klux , la sensibilidad del fotodiodo es de aproximadamente $10 \text{ mV}/\mu\text{s}$. Por tanto, si la tensión umbral del comparador se establece a 200 mV , el fotodiodo tarda en superar dicha tensión $20 \mu\text{s}$. Es decir, la frecuencia de frames equivalente del sensor octopus operando en el modo TFS es aproximadamente $1/20 \mu\text{s} = 50.000 \text{ fps}$ para un nivel de iluminación de 10 klux .

Por otro lado, cuando el sensor octopus opera en el modo continuo, la latencia no está limitada por el tiempo de integración, ya que el fotodiodo se supone que está precargado a la tensión V_{oc} en todo momento. En este caso, como la lectura de los píxeles iluminados no es de manera ordenada, es necesario leer toda la ROI, y como consecuencia, la latencia está limitada por el tamaño del área iluminada.

4.8.2. Latencia del sensor continuo

A diferencia del sensor octopus, el sensor continuo calcula el centroide de la región iluminada a través de la lógica circuital de la periferia. Por tanto, la latencia del dispositivo está limitada por el tiempo que tarda en calcular el centroide del área de interés. En el modo continuo la velocidad de operación está limitada por el tiempo de la lógica, es decir, depende del tiempo que tardan los transistores de pull-up en pasar a nivel bajo las señales row_i y col_j . Este tiempo es pequeño y se tiene que el máximo frame rate es 500.000 fps .

En cambio, cuando el sensor continuo opera en el modo de integración, la latencia además está limitada por el tiempo que se establece para que los fotodiodos alcancen la tensión umbral del comparador. Aunque la latencia es la suma del tiempo de integración (T_{int}), el tiempo de *hold* de los registros (T_{hold}) y el retraso de propagación de la lógica del cálculo del centroide (T_{logic}), resulta que $T_{int} \gg T_{hold} + T_{logic}$. Esto implica que el frame rate del sensor está limitado por el tiempo de integración, al igual que en el sensor octopus operando en el modo TFS. Por tanto, razonando del mismo modo se tiene que la frecuencia de frames máxima que se puede establecer es 50.000 fps para un iluminancia de 10 *klux*, es decir, 5 fps/lux.

4.9. Resumen de las características de los sensores solares

En esta sección se realiza, a modo de resumen de los resultados obtenidos, una comparación de los dos prototipos de sensores solares asíncronos caracterizados en este trabajo, exponiendo las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

En primer lugar, la resolución espacial en el cálculo del centroide de la región iluminada es significativamente mayor si se emplea el sensor octopus, ya que es posible detectar variaciones espaciales del foco de luz de subpixels si se tienen en cuenta los niveles de iluminación de los elementos de la matriz de píxeles. En cambio, como en el sensor continuo el cómputo del centroide se realiza dentro del chip determinando el centro de las líneas activadas, la única variación espacial posible es de 1 píxel; incluyendo además que no se tiene información acerca de los niveles de iluminación de la ROI. Como consecuencia mayor es la resolución angular del sensor octopus. Sin embargo, una de las ventajas del sensor continuo frente al octopus es que opera más rápido ya que el flujo de datos transmitido al exterior es menor, no es necesario realizar un post-procesado de la información y luego aplicar algoritmos para determinar el centroide de la región iluminada.

En cuanto al campo de visión, como es inversamente proporcional a la distancia focal ($2 \cdot \text{atan}(R_{max}/FD)$), cuanto menor sea FD , mayor es el rango de ángulos abarcable a través del cual el sensor detecta la luz. Con lo cual, como la distancia focal del sensor octopus empleando la lámina de cobre (espesor 0,2 mm y diámetro 0,5 mm) es inferior a la del sensor continuo con los dos tipos de ópticas dedicadas, la FOV es mayor (114,8° frente a 88,67°). Cabe recordar que la distancia focal se ha estimado mediante un ajuste lineal, ya que en principio es un parámetro desconocido.

Por otro lado, tras la calibración de las medidas proporcionados por los dos tipos de sensores solares se tiene que utilizando una curva de ajuste se consigue minimizar el error cometido en la medición de la posición del Sol. En el caso del sensor continuo se emplea un polinomio de dos grados menos que para el sensor octopus. Resulta que la precisión de los sensores después de la calibración es de 0,30° para la latitud y 1,47° para el azimut utilizando el sensor octopus, mientras que en el sensor continuo se tiene una precisión de 0,78° al determinar la latitud y 3,33° para el azimut. Es decir, empleando el método de calibración a través de una curva de ajuste, el sensor octopus es más preciso.

El consumo de energía de ambos sensores es debido principalmente al comparador, 4,88 nA por cada píxel iluminado, siendo posible alcanzar como máximo 20 μA de corriente estática si toda la matriz se ilumina. Una ventaja destacable del sensor continuo frente al sensor octopus es que el consumo de energía es inferior consumiendo 63 μW a 1.000 fps bajo condiciones de iluminación de 1 klux, frente a 1,07 mW del sensor octopus.

Con respecto a la resolución temporal, se ha analizado que los dos sensores operando en el modo continuo aparece un efecto “memoria”, que puede ser debido a que cuando los fotodiodos no están sensando iluminación, circula por ellos una corriente muy pequeña, lo que conlleva a que sus capacidades parásitas se descargan muy lentamente y aunque la matriz de píxeles esté oscura, existe una estela luminosa. Sin embargo, este fenómeno se puede disminuir variando la tensión umbral y se ha comprobado que no perjudica a la determinación de la posición relativa del Sol.

Por último, la latencia del sensor octopus operando en el modo TFS coincide con el tiempo de respuesta del sensor continuo en el modo de integración, ya que aunque en el primer caso hay que tener en cuenta el tiempo de lectura de los píxeles, y en el segundo caso el tiempo de la lógica que calcula el centroide, estos tiempos son despreciables y la latencia en ambos dispositivos está limitada por el tiempo de integración, resultando un frame rate máximo de 5 fps/lux. Por otro lado, el tiempo de respuesta de sensor octopus operando en el modo continuo depende del área iluminada, mientras que en el sensor continuo está limitada por el tiempo de pull-down, dando lugar a una frecuencia de frames máxima de 500.000 fps.

Como conclusión, se tiene que dependiendo de los requisitos necesarios es mejor un dispositivo u otro, ya que aunque el sensor octopus presente mayor resolución y campo de visión, el flujo de datos que se transmite al exterior es notablemente superior al del sensor continuo que únicamente envía las coordenadas (x_c, y_c) del centroide de la ROI. Por otro lado, el sensor continuo presenta un tiempo de respuesta inferior y un consumo de energía reducido a costa de tener menor precisión que el sensor octopus. En el siguiente apartado se recogen las características mencionadas en una tabla comparativa con otros dispositivos del estado del arte de los sensores solares.

4.10. Comparación del estado del arte

Para finalizar el capítulo, tras reportar los resultados de la caracterización experimental de los dos prototipos de sensores solares, se recogen en la Tabla 4.7 las características de interés de cada uno de los dispositivos comparándolas con otros sensores solares destacados.

El primer trabajo seleccionado para la comparación es el sensor solar de J.A. Leñero et al. [1]. Se trata de un sensor asíncrono basado en eventos, cuyo principio de operación es Time-to-First-Spike; computando la frecuencia de disparo de los píxeles se determina sus niveles de iluminación. Se calcula el centroide de la región iluminada considerando que los píxeles cercanos al centro de la ROI disparan con una frecuencia mayor que los píxeles que se encuentran en los bordes, aplicando el siguiente algoritmo: primero se espera un determinado tiempo hasta que se recibe un cierto número de eventos (mayor que uno) y se almacenan en una memoria las coordenadas de los píxeles iluminados. Luego, se computan las coordenadas del centroide realizando una media de las posiciones de dichos píxeles.

Por otro lado, tanto el sensor solar propuesto por Ning. et al. [2] como el sensor solar Galileo desarrollado para el programa de satélites de la ESA [14], son sensores digitales que emplean píxeles de tipo APS, cuyo principio de operación está basado en frames. El centroide de la región iluminada se calcula en una operación de lectura de adquisición-seguimiento en dos pasos: primero en el modo de adquisición se determina la ROI, y luego en el modo de tracking se obtienen las coordenadas del centroide del área iluminada.

El último sensor solar elegido está desarrollado por la empresa sevillana SOLARMEMS [36] especializada en el diseño de sensores solares para navegación espacial. Se trata de

un sensor solar analógico que determina la posición del Sol mediante el cociente de las fotocorrientes que circula por los 4 fotodiodos que constituyen al sensor.

Hay que añadir que los sensores basados en frames, el tiempo de respuesta es mayor que la frecuencia de frames equivalente, sin embargo, los autores solo reportan el frame rate del sensor y no consideran el tiempo necesario para el cómputo del centroide de la región iluminada, que es mayor cuando se leen matrices de píxeles completas. Teniendo esto en cuenta, los sensores solares de este trabajo son los que menor latencia presentan, siendo el favorito el sensor continuo operando en el modo continuo, ya que puede llegar hasta un frame rate máximo de 500.000 fps.

Aunque los dos prototipos de sensores solares caracterizados en este trabajo tienen la matriz de píxeles más pequeña, lo cual implica un menor campo de visión, tienen la mayor proporción FOV/píxel. Además, el FOV puede aumentarse simplemente incorporando una matriz de píxeles de mayor dimensión sin necesidad de cambiar/modificar otras componentes del chip.

Es necesario mencionar que el pitch del píxel no está optimizado en los diseños de los sensores solares de este trabajo, ya que presenta un fill-factor (relación entre área del fotodiodo y área del píxel completo) mayor del que se necesita para operar como sensor solar. Esto es debido a que los diseñadores reutilizaron un layout previo del píxel, y por este motivo se obtienen las dimensiones que resultan.

Por otra parte, la precisión de los sensores solares propuestos es peor que las reportadas por los otros trabajos. Una forma de solucionar esta desventaja es utilizando un enfoque de calibración más elaborado como podría ser el procedimiento propuesto por Ortega et. al. [23], donde emplean un sistema de posicionamiento angular de alta precisión para conseguir curvas de calibración de alta precisión y así lograr compensar además cualquier desalineación sufrida por el sensor en su fabricación.

Los sensores de este trabajo no destacan por su resolución, ya que es inferior al resto de sensores solares descritos, sin embargo, la resolución espacial del sensor octopus se puede mejorar considerando los niveles de iluminación de los píxeles para el cómputo del centroide, mientras que en el sensor continuo sería conveniente añadir un modo TFS para conseguir una resolución sub-píxeles.

Cabe resaltar que el sensor continuo es el que menor flujo de datos transmite al exterior, ya que dentro del chip se determina el centroide del área iluminada. Este es uno de los principales objetivos de los sensores solares, minimizar el flujo de datos, ya que se disminuye el consumo y se simplifica la comunicación y compatibilidad de la operación con otros dispositivos integrados en el sistema de navegación espacial.

Por último, el sensor solar de operación continuo presenta un consumo global medio de tres órdenes de magnitud inferior, debido al bajo flujo de datos transmitido al exterior del chip, al consumo reducido de la lógica encargada del cómputo del centroide de la región iluminada y gracias a operar como celda solar. Este sensor supera a los trabajos seleccionados en términos de latencia, consumo de energía y tasa de datos transmitido fuera del chip.

Tabla 4.7: Comparación del estado del arte de los sensores solares.

Trabajo	Sensor octopus	Sensor continuo	Leñero-Bardallo et al. [1]	Ning et al. [2]	Galileo ESA [14]	SSoC-DC60 [36]
Tipo	Sensor de luminosidad octopus	Sensor de luminosidad de modo continuo	Sensor de luminosidad basado en eventos	Sensor Digital APS	Sensor Digital APS	Sensor solar analógico
Principio de operación	Celda solar	Celda solar	TFS	Basado en frames	Basado en frames	Cociente entre fotocorrientes
Tecnología	UMC 0.18 μm	UMC 0.18 μm	AMS 0.18 μm HV	0.18 μm 1P4M	UMC 0.18 μm	ND
Tensión de alimentación	1,8 V	1,8 V	5/3,3 V	3,3/1,8 V	3,3/1,8 V	5 V
Dimensiones del chip	1370 μm × 1440 μm	1916 μm × 1916 μm	4120 μm × 3315 μm	5mm × 5mm	11mm × 11mm	ND
Matriz de píxeles	64 × 64 pixels	64 × 64 pixels	128 × 96 pixels	368 × 368 pixels	512 × 512 pixels	4 fotodiodos
Pixel Pitch	19,5 μm	19,5 μm	25 μm	6,5 μm	10 μm	NA
FOV (FOV/pix.)	114,80° (1,27°)	88,67° (0,98°)	146° (0,91°)	94° (0,18°)	128° (0,18°)	120°
Consumo de potencia	1,07 mW @ 1000 fps ¹	63 μW @ 1000 fps¹	52 mW	42,73 mW	520 mW	350 mW
Frame rate	5 fps/lux	500.000 fps	>200 fps@1klux	10 fps	10 fps	50 fps
Resolución	0,035°	1,23°	0,03°	0,004°	<0,005°	ND
Precisión	0,30°(θ), 1,47°(ϕ)	0,78°(θ), 3,33°(ϕ)	0,013°(θ), 0,05°(ϕ)	0,01°	0,024°	0,3°
Cantidad de datos (acquisition / tracking mode)	Coordenadas de píxeles iluminados	1 centroide (x_c, y_c)	1-100 Events	368 pixels / 25 × 25 pixels = 945 pixels	1 frame / ROI	Centroide ² (x_c, y_c)

1: Bajo unas condiciones de iluminación de 1 klux.

2: Tras un post-procesamiento con un microcontrolador.

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras

A lo largo de este trabajo se han descrito las ventajas de explotar los sensores solares asíncronos operando como celdas solares, ya que aprovechan la energía captada por la luz solar y así reducen el consumo de potencia. Esta es una característica del sensor destacable porque los diodos funcionando en la región fotovoltaica no se habían utilizado hasta la fecha, o al menos en lo que alcanza el conocimiento de la autora, para aplicaciones de determinación y control de actitud de sistemas de navegación espacial.

Este estudio se ha centrado en la puesta en marcha y caracterización de dos prototipos de sensores solares asíncronos operando en la región fotovoltaica. Se han obtenido y comparado las características estáticas, la precisión, la resolución espacial, angular y temporal, el campo de visión, el tiempo de respuesta en la operación y el consumo de energía de cada uno de los prototipos funcionando en sus diversos modos de operación.

Como conclusión, se llega a que en vista a los resultados medidos, se obtienen especificaciones muy competitivas a nivel industrial que hacen ambos sensores viables para aplicaciones espaciales que requieren baja latencia, consumo reducido y bajo ancho de banda, satisfaciendo la demanda del mercado.

Para finalizar, se plantean algunas tareas futuras para abordar y mejorar la caracterización de los dos tipos de sensores solares:

- Mejorar el setup experimental: a pesar de tener como referencia una regla digital que presenta una resolución superior ($0,05^\circ$) al de los sensores solares caracterizados, una tarea futura sería utilizar un montaje más sofisticado y un instrumento que simule el Sol, en lugar de utilizar una bombilla estándar.
- Mejorar el método de calibración para proporcionar medidas más precisas.
- Modificar el algoritmo que calcula del centroide para conseguir mayor resolución espacial. En términos de la arquitectura del sensor continuo, se podría añadir una lectura *Time-to-First-Spike* en paralelo para extraer los niveles de iluminación de los fotodiodos.
- Estudio más exhaustivo de la óptica dedicada de tipo pin-hole: analizar el grosor y tipo de material, ya que no se conoce con certeza si es preferible una lámina fina, donde no habría tantas reflexiones de la luz solar, pero la lámina se curvaría (provocando pequeñas variaciones de la distancia focal) o una lámina más rígida, resultando una distancia focal mayor, y un campo de visión menor. Otro estudio conveniente sería el tamaño del orificio de tipo pin-hole.

- Caracterizar los sensores en entorno de radiación para comprobar si los prototipos toleran la radiación espacial en vuelo. Esto es lo más prioritario de cara a una posible comercialización de los sensores, y es posible que el diseño deba optimizarse para que los dispositivos sean tolerantes a la radiación.
- Desarrollar un sensor híbrido que combine los dos modos de operación.

Bibliografía

- [1] J.A. Leñero-Bardallo, L. Farian, J.M. Guerra-Rodríguez, R. Carmona-Galán, A. Rodríguez-Vázquez. “Sun Sensor Based on a Luminance Spiking Pixel Array”. *IEEE Sensors Journal*, vol 17, no. 20, pp. 6578-6588, Oct. 2017.
- [2] N. Xie and A. J. P. Theuwissen, “A miniaturized micro-digital sun sensor by means of low-power low-noise CMOS imager”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 96–103, Jan 2014.
- [3] R. Gómez-Merchán, M. López-Carmona, J. A. Leñero-Bardallo, and A. Rodríguez-Vázquez, “A high-speed low-power sun sensor with solar cells and continuous operation”, Accepted for presentation at ESSCIRC-ESSDERC 2021 European Solid-state Circuits and Devices Conference, Grenoble, France, 6th-9th September, 2021.
- [4] “Euroconsult report about sun sensors, Available at https://www.euroconsult-ec.com/6_August_2018/. Last accessed: March 2021.”
- [5] E. Canuto et al, *Spacecraft Dynamics and Control a Practical Engineering Approach*. Elsevier, 2018.
- [6] Y. W. Jan and J. C. Chiou, “Attitude control system for ROCSAT-3 microsatellite: A conceptual design,” *Acta Astronautica*, vol. 56, pp. 439–452, 2005.
- [7] M. M. Birnbaum, “Spacecraft attitude control using star field trackers,” *Acta Astronautica*, vol. 39, pp. 763–773, 1996.
- [8] J.R. Wertz. *Spacecraft Attitude Determination and Control*. Springer, 1978.
- [9] N. Venkateswaren et al., “Precision pointing of imaging spacecraft using gyro-based attitude reference with horizon sensor updates”, *Sadhana*, vol. 29, part 2, pp. 189-203, Apr. 2004
- [10] V. Pisacane, *fundamental of Space Systems*, 2nd ed., Oxford: OUP, p. 258, 2005, ISBN: 0195162056.
- [11] M. Díaz-Michelena, “Small Magnetic Sensors for Space Applications”, *Sensors* (Basel), 9(4), 2271–2288, Mar. 2009.
- [12] N. Xie, A. J. P. Theuwissen, B. Büttgen, H. Hakkesteegt, H. Jasen and J. Leijtens, "Micro-Digital Sun Sensor: An imaging sensor for space applications," 2010 *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2010, pp. 3362-3365
- [13] C. Liebe et al., “Micro Sun Sensor”, *Proceeding of IEEE 2002 Aerospace conference, Big Sky, MT, USA*, pp. 2263-2273, March 2002.

- [14] F. Boldrini, E. Monnini, D. Procopio, B. Alison, W. Ogiers, M. Innocent, A. Pritchard, and S. Airey, "Attitude sensors on a chip: Feasibility study and breadboarding activities," in *Proceedings of 32nd Annual AAS Guided Control Conference*, February 2009, pp. 1197–1216.
- [15] P. Fortescue, *Spacecraft Systems Engineering*, Wiley 2011.
- [16] R. F. Pierret, *Semiconductor device fundamentals*. Addison-Wesley Publishing Company, 1996.
- [17] U. k. Mishra and J. Singh, *Semiconductor device physics and design*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2008.
- [18] S.S. Li, *Semiconductor physical electronics*. Springer, 2006.
- [19] G. N. Tiwari and S. Dubey, "Fundamentals of Photovoltaic Modules and their Applications". Royal Society of Chemistry, 2010.
- [20] J. A. Leñero-Bardallo, "Photoreceptors in CMOS", *Neuromorphic Electronics*, 2012.
- [21] R. Gomez-Merchán, D. Palomeque-Mangut, J. A. Leñero-Bardallo, M. Delgado-Restituto, and A. Rodríguez-Vazquez, "A comparative study of stacked-diode configurations operating in the photovoltaic region," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 16, pp. 9105–9113, 2020.
- [22] P. Appel, "Attitude estimation from magnetometer and earth-albedocorrected coarse sun sensor measurements", *Proceeding of 4th IAA International Symposium on Small Satellites for Earth Observation*, vol. 56, issues 1-2, pp. 115-126, Jan. 2005.
- [23] P. Ortega et al., "A miniaturized two axis sun sensor for attitude control of nanosatellites," *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 10, pp. 1623–1632, Oct. 2010.
- [24] J. M. Quero, C. Aracil, L. G. Franquelo, J. Ricart, P. R. Ortega, M. Dominguez, L. Castañer, and R. Osuna, "Tracking control system using an incident radiation angle microsensor," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 1207–1215, Apr. 2007.
- [25] C. Mead, "Neuromorphic electronic systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 78, no. 10, pp. 1629–1636, 1990.
- [26] M. Mahowald, *An analog VLSI system for stereoscopic vision*. Springer Science & Business Media, 1994.
- [27] K. Fukushima, Y. Yamaguchi, M. Yasuda and S. Nagata, "An electronic model of the retina," *Proceedings of the IEEE*, vol. 58, no. 12, pp. 1950-1951, Dec. 1970.
- [28] M. Silvilotti, "Wiring Considerations in Analog VLSI Systems with Application to Field programmable Networks," Ph.D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1991.
- [29] P. Lichtsteiner, C. Posch, and T. Delbruck, "A 128×128 120dB 15 μ s latency asynchronous temporal contrast vision sensor," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 43, no. 2, pp. 566–576, February 2008.

- [30] E. Culurciello, R. Etienne-Cummings, and K. A. Boahen, “A biomorphic digital image sensor,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 38, no. 2, pp. 281–294, 2003.
- [31] L. Farian, “Biological Inspired Sensors for Attitude Determination and Color Processing,” Ph.D. thesis, University of Oslo, Oslo, 2019.
- [32] 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.
- [33] A. Ali and F. Tanveer, “Low-cost design and development of 2-axis digital sun sensor,” *Journal of Space Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, June 2011.
- [34] L. Farian, P. Häfliger, and J. A. Leñero-Bardallo, “A miniaturized two-axis ultra low latency and low-power sun sensor for attitude determination of micro space probes,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 65, no. 5, pp. 1543–1554, May 2018.
- [35] J. A. Leñero-Bardallo, “Bioinspired Processing Algorithm, and Circuits” *Second Thematic Block*, University of Seville, 2021.
- [36] “SSOC-D60 SOLAR MEMS 2-axis digital sun sensor”, <https://www.cubesatshop.com/product/ssoc-d60-2-axis-digital-sun-sensor/>. Last accessed: July 2021.
- [37] R. Gómez-Merchán, “Diseño de un sensor de imagen asíncrono autoalimentado mediante captación de energía solar,” Máster’s thesis, Universidad de Sevilla, 2020.
- [38] A. Darwish, L. M. G. Rocha, L. Fesquet and G. Sicard, “Design of a fully asynchronous image sensor reading system,” 2015 *Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS)*.
- [39] J. A. Leñero-Bardallo, D. Bryn, and P. Häfliger, “Bio-inspired asynchronous pixel event tricolor vision sensor,” *Biomedical Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 3, pp. 345–357, June 2014.
- [40] E. Culurciello, R. Etienne-Cummings, and K. Boahen, “A biomorphic digital image sensor,” *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol. 38, no. 2, pp. 281–294, Feb 2003.
- [41] A. de la Calle-Martos, R. Gómez-Merchán, J. A. Leñero-Bardallo, and A. Rodríguez-Vázquez, “Sun tracker sensor for attitude control of space navigation systems,” in 2020 *IS&T International Symposium on Electronic Imaging*.
- [42] N. Xie and A.J. P. Theuwissen, “Low-power high-accuracy micro-digital sun sensor by means of a CMOS image sensor”. *Journal of Electronic Imaging*, vol 22, no 3, pp 033030:1-11. Jul–Sep 2013.
- [43] C. Posch, T. Serrano-Gotarredona, B. Linares-Barranco, and T. Delbruck, “Retinomorphic event-based vision sensors: Bioinspired cameras with spiking output,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 10, pp. 1470–1484, Oct 2014.
- [44] J. A. Leñero-Bardallo, R. Carmona-Galán, and A. Rodríguez-Vázquez, “Applications of event-based image sensors –Review and analysis,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 46, 08, 2018.

- [45] N. Massari et al., “High speed digital CMOS 2D optical position sensitive detector,” in *Proceedings of the 28th European Solid-State Circuits Conference. IEEE*, 2002, pp. 723–726.
- [46] S. Perkins, “Core Concept: Albedo is a simple concept that plays complicated roles in climate and astronomy,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Dec 2019, 116 (51) 25369-25371.