

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE INGENIERÍA

# Diseño, implementación y validación experimental de un sensor de Sol analógico para nanosatélites tipo CubeSat

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Aeroespacial**

**P R E S E N T A**

Luis Roberto Martínez Cervantes

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Jorge Prado Morales



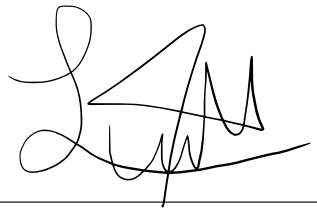
**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026**

**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL**
**(Titulación con trabajo escrito)**

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DISEÑO, IMPLEMENTACION Y VALIDACION EXPERIMENTAL EN TIERRA DE UN SENSOR DE SOL ANALOGICO PARA NANOSATELITES TIPO CUBESAT que presenté para obtener el titulo de INGENIERO AEROESPACIAL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.



**LUIS ROBERTO MARTINEZ CERVANTES**
**Número de cuenta: 318223647**

A mis padres
Mónica Cervantes y Álvaro Martínez

# Dedicatoria

A mi padre, Álvaro Martínez, quien me enseñó el valor del trabajo, la disciplina y la perseverancia para alcanzar cada uno de mis objetivos.

A mi madre, Mónica Cervantes, quien me enseñó que incluso en la adversidad todo puede lograrse con esfuerzo y dedicación; quien siempre creyó en mí, aun cuando yo mismo dudaba de mis capacidades, y que nunca dejó de motivarme a seguir adelante.

Les agradezco cada esfuerzo que han dedicado a que yo sea feliz, por siempre acompañarme en cada nueva etapa de mi vida, espero que este trabajo los llene de orgullo y que puedan ver reflejado en él todo lo que han sembrado en mí. Gracias por formar no solo al profesionista que hoy soy, sino también a la persona en la que me he convertido. Todo esto es por y para ustedes.

A mis abuelos, por ser siempre una de mis mayores motivaciones para perseguir cada una de mis metas. Este trabajo también está dedicado a ustedes, por todo el amor, apoyo y confianza incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida, especialmente a Abigail † y Luz.

A mis amigos Diana, Fernanda, Lino, Mafer, Natalia, Esteban, Joceline, Rodrigo, Yael, Jessica, Juliana, Tonatiuh, Emiliano, Omar y Paola, quienes se convirtieron en una pequeña gran familia para mí. Gracias por acompañarme en mis momentos más difíciles, por su apoyo incondicional y por regalarme recuerdos y experiencias que siempre atesoraré. Concluir la carrera y este trabajo no hubiera sido posible sin ustedes, sin su apoyo, sin esas pláticas en donde me sentía comprendido y escuchado, y sobre todo, sin esa capacidad de siempre sacarme una sonrisa cuando más lo necesitaba.

A mis amigos y compañeros que, sin importar las diferencias de edad o de entorno, me brindaron su apoyo, compañía y amistad durante esta etapa.

A mis tías, tíos y primos, quienes siempre me impulsaron a seguir adelante y me acompañaron en cada paso de este camino.

A aquellos profesores que ejercen la docencia con verdadera pasión y que, a través de ella, logran transmitir su amor por el conocimiento y por cada una de las materias que imparten. Gracias por inspirarme y motivarme a seguir aprendiendo.

Al Instituto de Geografía por brindarme el apoyo para usar las instalaciones y poder realizar la parte experimental de este trabajo.

Y, de manera especial, al M.I. Jorge Prado Morales, quien más allá de ser mi asesor, se convirtió en un gran colega y amigo. Gracias por enseñarme el valor de la perseverancia, el trabajo con pasión y el compromiso profesional. Además de brindarme valiosas lecciones académicas, también me apoyó en lo personal y profesional durante este proceso. Espero que este trabajo le resulte tan satisfactorio como lo es para mí.

Índice

**Introducción..... 1**
Planteamiento del problema.....1
Antecedentes..... 2
Justificación.....4
Objetivo general..... 4
Objetivos específicos..... 4
Alcances y limitaciones..... 5
Metodología.....5
**Capítulo I Fundamentos y contexto tecnológico del sensor de Sol en plataformas CubeSat.....7**
1.1 Plataforma CubeSat.....7
1.1.1 Estándar y Configuraciones..... 7
1.1.2 Restricciones de Integración..... 8
1.2 Subsistemas principales de una plataforma CubeSat.....9
1.3 Sistema de determinación y control de orientación.....11
1.3.1 Determinación de orientación.....12
1.3.2 Control de Orientación..... 12
1.3.3 Elementos funcionales del sistema..... 13
1.4 Sensores utilizados para la determinación de orientación..... 13
1.4.1 Giróscopos..... 14
1.4.2 Magnetómetros..... 14
1.4.3 Sensores de horizonte..... 15
1.4.4 Sensores estelares.....15
1.4.5 Sensores de Sol..... 15
1.4.6 Comparación funcional.....15
1.5 Sensores de Sol..... 16
1.5.1 Función del sensor de Sol.....17
1.5.2 Aplicaciones dentro del sistema de orientación..... 17
1.5.3 Sensores burdos y finos.....18
1.5.4 Sensores de Sol analógicos.....18
1.5.5 Sensores de Sol digitales.....19
1.5.6 Fuentes de error y limitaciones..... 19
1.6 Revisión bibliográfica de sensores de Sol para nanosatélites..... 20
1.6.1 Desarrollos académicos.....20
1.6.2 Dispositivos comerciales.....21
1.6.3 Comparación de configuraciones.....23
1.7 Síntesis y criterios para el desarrollo..... 23
**Capítulo II Fundamentos y condiciones de operación del sensor de Sol analógico.... 25**
2.1 Fundamentos de la medición de la dirección solar..... 25
2.1.1 Sistema de referencia del sensor.....25
2.1.2 Componentes angulares de la dirección solar..... 26
2.1.3 Representación de la dirección solar..... 26
2.2 Requerimientos funcionales para la medición.....27

2.3 Configuraciones para la medición angular....28
2.4 Selección de la configuración analógica con ventana....29
2.5 Fundamentos físicos de detección....30
2.5.1 Irradiancia sobre el plano fotosensible....30
2.5.2 Conversión fotoeléctrica en el detector....31
2.5.3 Potencia óptica y fotocorriente....32
2.5.4 Respuesta eléctrica del canal....32
2.6 Principio de medición del sensor seleccionado....33
2.6.1 Acondicionamiento y adquisición de las señales....34
2.6.2 Procesamiento diferencial normalizado....34
2.6.3 Relación entre los índices normalizados y los ángulos....34
2.6.4 Obtención de componentes angulares....35
2.7 Condiciones de operación y fuentes de desviación....35
2.7.1 Diferencias entre elementos fotosensibles....35
2.7.2 Diferencias entre canales electrónicos....36
2.7.3 Desviaciones geométricas....36
2.7.4 Condiciones de iluminación....36
2.7.5 Temperatura y condiciones ambientales....36
2.7.6 Implicaciones para la evaluación del sensor....37
2.8 Referencias tecnológicas y criterios de evaluación....37
2.8.1 Campo de visión....38
2.8.2 Error angular....38
2.8.3 Resolución angular....38
2.8.4 Sensibilidad....39
2.9 Síntesis para el modelado....40
**Capítulo III Modelado paramétrico del sensor de Sol analógico....42**
3.1 Definición geométrica del modelo....42
3.1.1 Sistema de referencia y dirección solar....43
3.1.2 Geometría del arreglo y de la apertura....44
3.1.3 Variables y supuestos del modelo....45
3.2 Modelo de proyección e iluminación....46
3.2.1 Desplazamiento de la proyección....47
3.2.2 Área iluminada de los fotodiodos....47
3.3 Modelo de respuesta del instrumento....49
3.3.1 Potencia óptica y fotocorriente....49
3.3.2 Señal eléctrica de cada canal....50
3.4 Modelo diferencial normalizado....50
3.4.1 Señales diferenciales e índices normalizados....51
3.4.2 Cancelación de factores comunes y no idealidades....51
3.5 Relación señal-ángulo y reconstrucción del vector solar....52
3.5.1 Relación directa e inversa....52
3.5.2 Región aproximadamente lineal....53
3.5.3 Construcción del vector solar....53
3.6 Predicción del desempeño....54

3.6.1 Límite geométrico e intervalo geométrico útil....54
3.6.2 Sensibilidad y relación con la resolución angular....55
3.6.3 Influencia de parámetros geométricos....56
3.6.4 Implementación numérica del modelo....57
3.7 Parámetros sujetos a determinación experimental....58
3.8 Síntesis del modelo....60
**Capítulo IV Diseño del sensor de Sol analógico....62**
4.1 Criterios y parámetros de diseño....62
4.1.1 Selección del elemento fotosensible....63
4.1.2 Geometría nominal y geometría utilizada por el modelo....64
4.2 Diseño electrónico....66
4.2.1 Adquisición analógico-digital....67
4.2.2 Sensor auxiliar de temperatura....67
4.3 Diseño PCB....68
4.3.1 Dimensiones y organización del layout....68
4.3.2 Materiales y referencias de diseño....69
4.4 Diseño digital....69
4.4.1 Adquisición y cálculo de los índices normalizados....70
4.5 Diseño mecánico....71
4.5.1 Apertura, base y tapa....72
4.5.2 Alineación e integración....73
4.5.3 Selección del material....73
4.6 Diseño final y comportamiento esperado del instrumento....74
4.6.1 Particularización del modelo en MATLAB....75
4.6.2 Respuesta y sensibilidad previstas....75
4.6.3 Arquitectura funcional final....77
4.7 Recapitulación del capítulo....78
**Capítulo V Implementación y validación experimental....79**
5.1 Fabricación e integración del prototipo....79
5.1.1 Fabricación y ensamble de la PCB....79
5.1.2 Fabricación de la estructura mecánica....80
5.1.3 Acabado superficial....81
5.1.4 Integración final....82
5.1.5 Verificación inicial de la respuesta eléctrica....82
5.2 Metodología experimental....83
5.2.1 Banco de pruebas....83
5.2.2 Referencia angular experimental....85
5.2.3 Adquisición de las señales....85
5.2.4 Alineación temporal de los registros....85
5.2.5 Configuraciones de prueba....85
5.2.6 Procedimiento por posiciones....86
5.3 Calibración....86
5.3.1 Señales diferenciales normalizadas....87
5.3.2 Obtención de las curvas de calibración....87

5.3.3 Interpolación experimental..... 88
5.3.4 Incorporación al microcontrolador..... 89
5.4 Caracterización experimental..... 90
5.4.1 Respuesta de los canales fotosensibles..... 90
5.4.2 Respuesta normalizada y sensibilidad..... 91
5.4.3 Intervalo angular observado..... 92
5.4.4 Reconstrucción de la dirección solar..... 92
5.5 Error angular..... 93
5.6 Comparación modelo–experimento..... 96
5.6.1 Modelo geométrico frente a respuesta física..... 96
5.6.2 Comparación de parámetros angulares..... 98
5.6.3 Sensor calibrado frente a referencia experimental..... 98
5.7 Verificación funcional y discusión..... 99
5.7.1 Verificación de las funciones implementadas..... 99
5.7.2 Discusión del comportamiento observado..... 100
5.7.3 Limitaciones experimentales..... 100
5.7.4 Alcance de la validación realizada..... 100
5.7.5 Recapitulación del capítulo..... 101
**Capítulo VI Conclusiones y trabajo futuro..... 102**
6.1 Cumplimiento de los objetivos y resultados principales..... 102
6.2 Contribuciones y limitaciones del trabajo..... 104
6.2.1 Contribuciones..... 104
6.2.2 Limitaciones..... 105
6.3 Trabajo futuro..... 106
**Referencias..... 108**
**Anexos..... 110**
Anexo A. Diagrama Eléctrico del sensor..... 110
Anexo B. Planos de la estructura mecánica de aluminio..... 110
Anexo C. Código de adquisición utilizado durante la caracterización..... 112

# Introducción

Las plataformas CubeSat permiten desarrollar satélites de dimensiones reducidas cuya arquitectura debe integrarse dentro de restricciones de masa, volumen, potencia y procesamiento. Debido a estas condiciones, la selección de los componentes y subsistemas debe realizarse a partir de los requerimientos particulares de la misión y de las interfaces disponibles en la plataforma [1]-[3].

Entre las funciones que pueden requerirse durante una misión, se encuentra la determinación y el control de la orientación del vehículo. Para ello se utilizan sensores que proporcionan información del movimiento del satélite y de referencias externas conocidas. Dependiendo de la misión, esta información puede emplearse para orientar una carga útil, establecer una condición determinada de iluminación sobre los paneles solares, mantener una antena dentro de una región de apuntamiento o realizar maniobras de reorientación [1], [4].

El sensor de Sol constituye una de las posibles fuentes de referencia externa utilizadas para este propósito, ya que permite determinar la dirección de la radiación solar respecto al sistema de coordenadas del instrumento. Esta medición puede incorporarse posteriormente a un algoritmo de determinación de orientación, sola o en combinación con otras referencias. Los sensores de Sol pueden implementarse mediante diferentes principios de detección, entre ellos fotodetectores individuales, arreglos diferenciales, detectores lineales y sensores de imagen.

En el Laboratorio de Percepción Remota Alternativa y Tecnología Avanzada del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México se han desarrollado diferentes configuraciones de sensores de Sol para satélites pequeños. Estos antecedentes incluyen arreglos de fotoceldas, arreglos lineales de fotodiodos y detectores bidimensionales CMOS, por lo que proporcionan una referencia directa para el desarrollo presentado en este trabajo.

El presente proyecto retoma la configuración de cuatro elementos fotosensibles dispuestos en cruz e incorpora en el propio instrumento la adquisición y el procesamiento de las señales. A partir de relaciones normalizadas entre los canales se obtienen los ángulos de incidencia y la dirección solar, mientras que la integración de estas funciones en una misma arquitectura busca reducir la cantidad de electrónica y procesamiento externos requeridos por el instrumento.

## Planteamiento del problema

El desarrollo de un sensor de Sol para una plataforma nanosatelital requiere considerar de manera conjunta la geometría del instrumento, la respuesta de los elementos fotosensibles, la electrónica de acondicionamiento, la adquisición de las señales y el procesamiento utilizado para determinar la dirección solar. En una plataforma CubeSat, estos elementos deben integrarse dentro de los recursos disponibles de masa, volumen y potencia, por lo que el tamaño y la complejidad de la electrónica constituyen variables de diseño.

Los desarrollos realizados previamente en el laboratorio muestran diferentes soluciones para obtener la información angular. Las configuraciones basadas en elementos fotosensibles independientes requieren etapas de acondicionamiento y procesamiento para comparar las señales, mientras que los sensores basados en arreglos lineales o bidimensionales requieren además circuitería de temporización y adquisición asociada con la lectura de múltiples elementos. En ambos casos, la arquitectura electrónica y mecánica condiciona las dimensiones finales del instrumento.

En una configuración formada por varios elementos fotosensibles, la estimación angular depende de la relación entre sus señales. Cuando la iluminación varía de manera aproximadamente común sobre los diferentes canales, utilizar únicamente diferencias absolutas puede introducir una dependencia respecto al nivel total de señal. Una alternativa consiste en utilizar diferencias normalizadas, en las cuales la diferencia entre las señales se relaciona con su suma. Bajo las condiciones establecidas por el modelo, este procedimiento permite reducir la sensibilidad frente a variaciones comunes de intensidad, aunque no elimina errores asociados con desbalance entre detectores, temperatura, saturación, alineación o iluminación no uniforme.

A partir de estas condiciones se plantea el desarrollo de un sensor de Sol basado en cuatro elementos fotosensibles dispuestos en cruz y un microcontrolador encargado de realizar la adquisición y el procesamiento local. La arquitectura integra las funciones de lectura, normalización y cálculo angular en el propio instrumento, tomando como referencia las restricciones de integración de una plataforma CubeSat 3U.

## Antecedentes

En el Laboratorio de Percepción Remota Alternativa y Tecnología Avanzada del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México se ha desarrollado una línea de trabajo relacionada con sensores de Sol para aplicaciones de determinación de orientación. Los instrumentos realizados han empleado diferentes configuraciones de detección y procesamiento, lo que permite establecer una referencia para comparar la arquitectura propuesta en esta tesis.

En 2003, Daniel Ruiz Zavala desarrolló un sensor basado en cuatro fotoceldas dispuestas en cruz para obtener información angular en dos ejes. El instrumento utilizaba diferencias entre las señales de cada par de fotoceldas, acondicionamiento electrónico y procesamiento mediante un microcontrolador HC11. El prototipo reportó una cobertura aproximada de $\pm\ 22°$ por eje y una resolución de $\pm\ 0.18°$. El cuerpo mecánico tenía aproximadamente 7.16 cm por lado y 2.8 cm de altura, con una masa reportada de 70 g.

Posteriormente, Edgar Nápoles Ceja desarrolló en 2009 un sensor basado en un arreglo lineal de 256 fotodiodos y una rendija. En esta configuración, el ángulo se determinaba a partir de la posición de la región iluminada sobre el arreglo. Aunque el diseño contemplaba dos detectores mutuamente perpendiculares para obtener información en dos ejes, el prototipo implementado utilizó un solo arreglo. El cuerpo correspondiente a un eje presentó dimensiones aproximadas de 72 × 48 × 26 mm, mientras que la electrónica fue implementada inicialmente en una tarjeta de 80 × 70 mm.

En 2014, Ricardo Hernández Abraham retomó la configuración de cuatro celdas solares en arreglo cruzado. El instrumento utilizó acondicionamiento y amplificación de las señales, conversión analógico-digital y procesamiento mediante software. El desarrollo estableció un intervalo cercano a $\pm\ 22°$ por eje y una resolución nominal de $0.1°$; durante las pruebas se reportaron errores de hasta aproximadamente $\pm\ 0.3°$. Además, se modificó la electrónica respecto a propuestas anteriores para trabajar con una sola tensión de alimentación y reducir el número de componentes mediante procesamiento digital.

En 2015, Héctor Hugo Arriaga Arroyo desarrolló un sensor basado en un arreglo bidimensional CMOS de píxel activo para obtener información angular en dos ejes. El diseño utilizó un detector Aptina MT9P031I12S de 2592 × 1944 píxeles activos y un convertidor analógico-digital integrado de 12 bits. La geometría propuesta produjo un intervalo geométrico ideal de $87.44°$ en el eje horizontal y $71.16°$ en el vertical. El documento reporta valores angulares teóricos de $0.0335°$ y $0.0365°$; debido a que éstos se obtuvieron dentro del desarrollo geométrico, no se consideran directamente como valores de exactitud experimental. La arquitectura requirió además un PIC18F4550 para generar las señales de barrido y un PIC32MZ2048EFH100 para realizar el procesamiento.

La Tabla 0.1 resume las características de los desarrollos anteriores y su relación con la arquitectura propuesta.

| Desarrollo | Año | Configuración | Ejes Implementados | Intervalo angular Reportado | Desempeño reportado |
|---|---|---|---|---|---|
| Ruiz Zavala | 2003 | Cuatro fotoceldas en cruz | 2 | ±22° por eje | Resolución ±0.18° |
| Nápoles Ceja | 2009 | Arreglo lineal de 256 fotodiodos y rendija | 1 construido | ±22.5° | Resolución asociada a la posición del arreglo |
| Hernández Abraham | 2014 | Cuatro celdas solares en cruz | 2 | ≈±22° por eje | Resolución 0.1°, error hasta ≈±0.3° |
| Arriaga Arroyo | 2015 | CMOS bidimensional y apertura | 2 | 87.44° x 71.16° | Valores angulares teóricos de 0.0335° y 0.0365° |
| Trabajo Actual | 2026 | Cuatro elementos fotosensibles en cruz | 2 | Modelo: 31.165° total por eje. Experimento: 34.890° en X y 33.301° en Y. | RMSE de reconstrucción: 0.1967° en X y 0.1802° en Y. |

**Tabla 0.1**. Características de desarrollos anteriores y propuesta.

A partir de estos antecedentes se identifican dos estrategias principales: la comparación de señales generadas por elementos fotosensibles independientes y la determinación de la posición de iluminación sobre un detector lineal o bidimensional. El presente trabajo retoma la primera configuración e incorpora la adquisición, normalización y cálculo angular dentro del propio instrumento, con la finalidad de reducir las dimensiones y el procesamiento externo respecto a los desarrollos anteriores

## Justificación

Los antecedentes muestran que las diferentes configuraciones permiten determinar la dirección solar, aunque cada una presenta requerimientos particulares de geometría, electrónica y procesamiento. Los primeros desarrollos basados en fotoceldas utilizaron cuerpos mecánicos y circuitos de acondicionamiento de dimensiones mayores a las consideradas para el instrumento actual, mientras que las configuraciones basadas en arreglos lineales y bidimensionales requieren temporización y procesamiento asociados con la lectura de múltiples elementos.

Por esta razón se propone retomar la configuración de cuatro elementos fotosensibles en cruz e integrar en una sola arquitectura las funciones de acondicionamiento, adquisición y procesamiento. La incorporación de un microcontrolador permite realizar localmente el cálculo angular y disminuir la cantidad de procesamiento requerido fuera del instrumento.

El uso de diferencias normalizadas constituye una modificación respecto a los desarrollos anteriores basados principalmente en diferencias absolutas de señal. Este procedimiento busca reducir la dependencia de la estimación angular frente a variaciones comunes de intensidad. Su efecto se evalúa mediante el modelo y las pruebas experimentales, por lo que no se asume independencia respecto a temperatura u otras variables que no sean caracterizadas durante el desarrollo.

La caracterización experimental del prototipo permite determinar el intervalo de respuesta angular observado y cuantificar el error respecto a la referencia utilizada durante las pruebas. Estos resultados permiten evaluar la arquitectura propuesta y establecer las modificaciones requeridas antes de considerar etapas posteriores de integración o calificación ambiental.

## Objetivo general

Diseñar, implementar y validar experimentalmente en tierra un prototipo funcional de sensor de Sol analógico para plataformas nanosatelitales, tomando como referencia una configuración CubeSat 3U, mediante un arreglo en cruz de cuatro elementos fotosensibles y procesamiento local de las señales, con la finalidad de obtener los ángulos de incidencia y la dirección solar, así como caracterizar su respuesta angular experimental y cuantificar el error angular respecto a la referencia utilizada.

## Objetivos específicos

- Analizar los fundamentos, configuraciones y desarrollos previos de sensores de Sol para establecer los criterios de diseño aplicables al instrumento.
- Desarrollar el modelo matemático y geométrico que relacione la respuesta de los elementos fotosensibles con los ángulos de incidencia, incorporando diferencias normalizadas y la determinación del intervalo geométrico ideal.
- Diseñar e implementar la arquitectura electrónica, mecánica y de procesamiento del sensor, incluyendo la selección de componentes, la tarjeta de circuito impreso, la estructura mecánica y el algoritmo ejecutado por el microcontrolador.

- Caracterizar experimentalmente el prototipo mediante un banco de pruebas en tierra para determinar su intervalo de respuesta angular y cuantificar el error angular respecto a una referencia angular experimental.
- Comparar los resultados experimentales con el modelo desarrollado para evaluar el comportamiento del instrumento, analizar las diferencias observadas y establecer sus limitaciones.

## Alcances y limitaciones

El trabajo comprende el modelado matemático y geométrico del sensor, la selección de componentes, el diseño de la electrónica de acondicionamiento y adquisición, la implementación del procesamiento local, el diseño mecánico, la fabricación e integración del prototipo y su validación experimental en tierra.

La arquitectura se desarrolla tomando como referencia las restricciones de integración de una plataforma CubeSat 3U. Esta condición establece un marco de diseño y no implica que el instrumento se limite exclusivamente a este tipo de plataforma.

La salida del sensor está constituida por los ángulos de incidencia y la dirección solar calculados respecto a su propio sistema de referencia. La validación comprende la determinación del intervalo angular experimental y la cuantificación del error angular dentro de las condiciones evaluadas.

Las pruebas se realizan en un entorno de laboratorio utilizando una fuente de iluminación y una referencia angular experimental. No se contemplan pruebas de termovacío, vibración, choque, radiación ionizante ni validación en órbita, por lo que los resultados corresponden únicamente a las condiciones utilizadas durante la caracterización.

La normalización de las señales se evaluará respecto a variaciones de intensidad incluidas dentro del procedimiento experimental. No se establecerá independencia respecto a temperatura ni a otras variables ambientales que no hayan sido caracterizadas.

Finalmente, el sensor proporciona una medición de la dirección solar y no una solución completa de orientación tridimensional del vehículo. Para obtener esta última se requiere integrar la medición con información adicional dentro del sistema de determinación y control de orientación.

## Metodología

El desarrollo del trabajo se organiza en tres etapas generales: antecedentes y fundamentos, diseño e implementación, y validación experimental y análisis de resultados.

**Antecedentes y fundamentos.** Se revisan los fundamentos relacionados con sensores de Sol y sistemas de determinación y control de orientación, así como los desarrollos realizados previamente en el laboratorio y otras configuraciones empleadas en pequeños satélites. A partir de esta información se establecen los criterios de diseño y se desarrolla el modelo matemático y geométrico útil para relacionar las señales de los elementos fotosensibles con los ángulos de incidencia.

**Diseño e implementación.** Con base en los criterios establecidos se desarrolla la arquitectura del instrumento. Esta etapa comprende la selección de componentes, el diseño de la electrónica de acondicionamiento y adquisición, la tarjeta de circuito impreso, la implementación del algoritmo de diferencias normalizadas y cálculo angular, así como el diseño y fabricación de la estructura mecánica. Posteriormente se realiza la integración del prototipo y la verificación de su funcionamiento.

**Validación experimental y análisis de resultados.** El prototipo se caracteriza mediante un banco de pruebas en tierra utilizando una fuente de iluminación y una referencia angular experimental. A partir de las mediciones se determina el intervalo angular experimental y se cuantifica el error angular respecto a la referencia utilizada. Finalmente, los resultados se comparan con el modelo desarrollado para analizar las principales diferencias y establecer las limitaciones del instrumento.

Capítulo

# 1

# Fundamentos y contexto tecnológico del sensor de Sol en plataformas CubeSat

En este capítulo se establece el contexto necesario para ubicar al sensor de Sol dentro de una plataforma CubeSat. Se presentan de manera general las características del estándar y los principales subsistemas que conforman al vehículo, para posteriormente concentrar el análisis en el sistema de determinación y control de orientación. A partir de esta estructura se revisan los sensores utilizados para obtener información de orientación y velocidad angular, así como los principios y configuraciones generales empleados para determinar la dirección del Sol.

Posteriormente se analizan los sensores de Sol de acuerdo con su principio de medición y forma de procesamiento, tomando en cuenta que las clasificaciones analógica, digital, burda o fina describen características diferentes del instrumento y no determinan por sí mismas su desempeño. Finalmente, se realiza una revisión bibliográfica de desarrollos académicos y dispositivos comerciales con la finalidad de identificar configuraciones representativas y establecer el contexto tecnológico para la arquitectura desarrollada en este trabajo.

## 1.1 Plataforma CubeSat

El desarrollo de un instrumento destinado a una plataforma espacial requiere considerar las condiciones impuestas por el vehículo en el cual será integrado. En el caso de los CubeSats, estas condiciones se encuentran relacionadas principalmente con la envolvente mecánica, las interfaces con el sistema de despliegue y los recursos disponibles de masa, volumen, potencia, procesamiento y comunicaciones. Por esta razón, antes de analizar el sensor de Sol resulta necesario establecer brevemente las características de la plataforma considerada como referencia.

### 1.1.1 Estándar y Configuraciones

El proyecto CubeSat surgió en 1999 como una colaboración entre California Polytechnic State University y el Space Systems Development Laboratory de Stanford University, con el propósito de facilitar el desarrollo y acceso al espacio de satélites de pequeñas dimensiones. A partir de esta iniciativa se estableció un formato modular basado en una unidad denominada U, que permite definir configuraciones de diferentes longitudes manteniendo interfaces compatibles con sistemas de despliegue normalizados [1].

La especificación CubeSat Design Specification, en su revisión 14.1, considera configuraciones comprendidas entre 1U y 12U y establece criterios relacionados con dimensiones, interfaces mecánicas, materiales, elementos de inhibición eléctrica y condiciones para la integración con el dispensador [1]. Las principales configuraciones dimensionales consideradas por el estándar se muestran en la Figura 1.1. Sin embargo, la propia especificación distingue entre lineamientos generales y requerimientos que finalmente dependen del proveedor de lanzamiento y del sistema de despliegue utilizado. Por esta razón, el estándar proporciona un marco de integración, pero no determina por sí mismo todos los requerimientos de una misión.

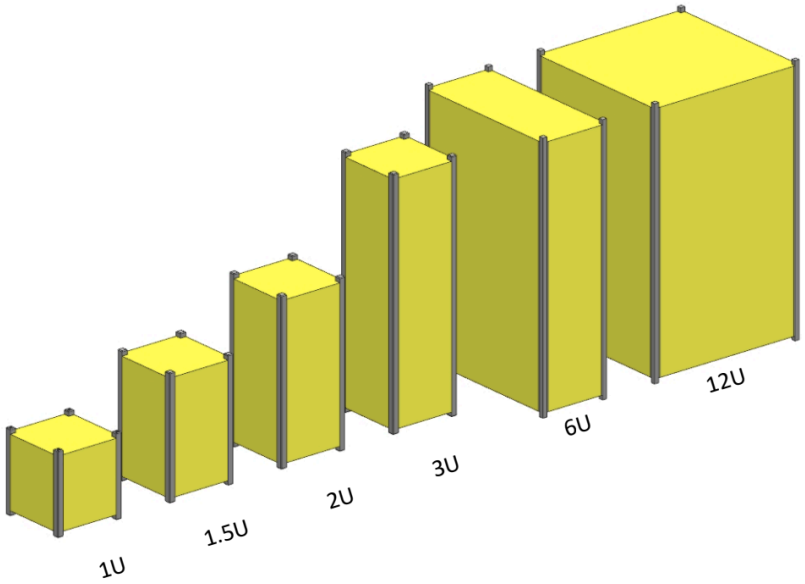



**Figura 1.1.** Configuraciones dimensionales del estándar CubeSat. Adaptado de California Polytechnic State University [1].

La modularidad del formato permite asignar diferentes fracciones del volumen disponible al bus satelital y a la carga útil. En una plataforma 3U, utilizada como referencia en este trabajo, el instrumento debe compartir los recursos disponibles con los sistemas necesarios para generación y distribución de energía, procesamiento, comunicaciones, control térmico y determinación y control de orientación. El empleo de esta configuración como caso de referencia no implica que el sensor desarrollado sea exclusivo para un vehículo 3U, ya que su compatibilidad final depende de las interfaces y recursos definidos para cada plataforma.

### 1.1.2 Restricciones de Integración

La integración de un instrumento en una plataforma CubeSat constituye un problema de distribución de recursos. La geometría del estándar establece una envolvente mecánica y determinadas superficies de interfaz con el dispensador, mientras que el presupuesto de masa se distribuye entre la estructura, los subsistemas del bus y la carga útil [1], [6]. En consecuencia, el tamaño y la masa de un sensor deben evaluarse respecto a la arquitectura completa y no mediante un valor porcentual universal aplicable a todos los CubeSats.

Una condición semejante ocurre con la potencia eléctrica. El estándar CubeSat no establece un consumo disponible único para cada subsistema, ya que la energía que puede

generarse y almacenarse depende, entre otros parámetros, del área de los paneles solares, la órbita, la orientación del vehículo, la capacidad de las baterías y el perfil de operación de la misión [2], [7]. Por esta razón, el consumo del sensor debe considerarse como parte del presupuesto de potencia de la plataforma particular en la que será integrado.

El volumen disponible también se relaciona con las interfaces mecánicas y eléctricas del instrumento. La posición del sensor de Sol presenta una condición adicional debido a que el elemento fotosensible requiere una línea de vista hacia el exterior del vehículo. Su ubicación debe evitar obstrucciones generadas por la estructura, antenas, paneles desplegables u otros componentes que puedan limitar el intervalo geométrico ideal o producir reflexiones sobre el detector.

Estas restricciones muestran que la selección de una arquitectura para el sensor de Sol no puede realizarse únicamente a partir de su desempeño angular. También deben considerarse sus dimensiones, alimentación, electrónica de adquisición, interfaces de comunicación, ubicación en el vehículo y requerimientos de procesamiento. La relación entre estas variables se retoma posteriormente durante el diseño del instrumento.

## 1.2 Subsistemas principales de una plataforma CubeSat

Un CubeSat se organiza mediante bloques funcionales que permiten distribuir las funciones necesarias para operar el vehículo. La configuración específica depende de la misión, pero normalmente pueden identificarse la estructura, el sistema de potencia eléctrica, la computadora de a bordo, las telecomunicaciones, el control térmico, la carga útil y el sistema de determinación y control de orientación [2], [6], [7]. La relación general entre estos subsistemas se representa en la Figura 1.2. mientras que la función principal de cada uno se resume en la Tabla 1.1.

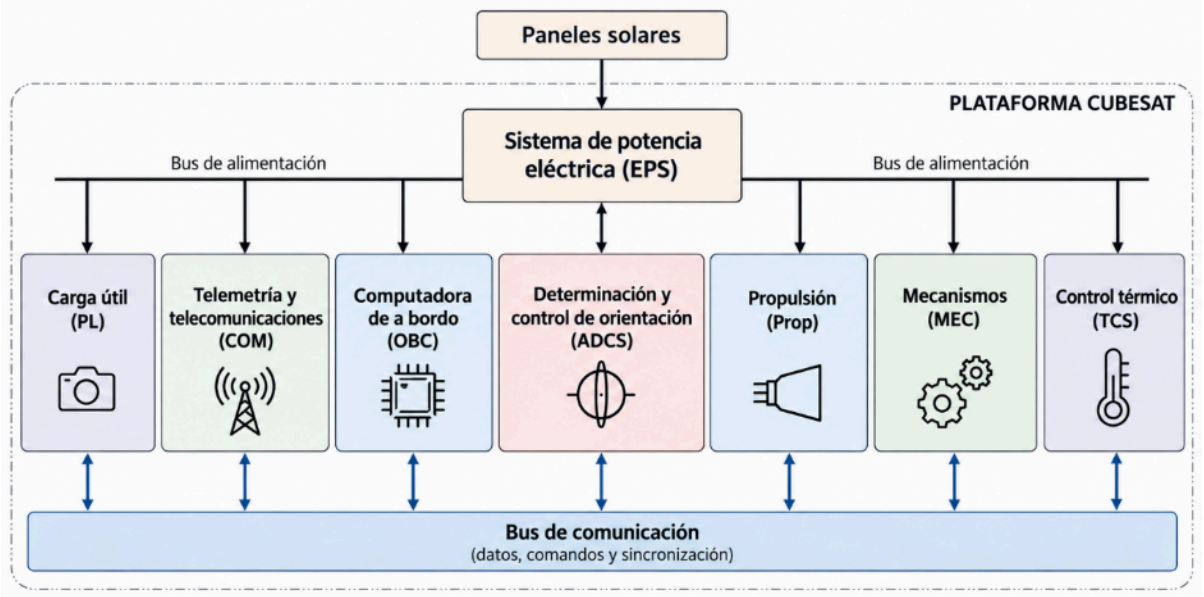



**Figura 1.2.** Subsistemas principales considerados en una plataforma CubeSat y relación funcional con el sistema de determinación y control de orientación. Elaboración propia.

La separación mostrada en la tabla se utiliza principalmente para facilitar el análisis y diseño, ya que durante la operación existen interacciones entre los diferentes subsistemas.

Por ejemplo, una modificación en los requerimientos de apuntamiento de una carga útil puede cambiar las necesidades del sistema de determinación y control de orientación y, a su vez, afectar los presupuestos de potencia, masa y procesamiento.

La estructura proporciona el soporte físico para los componentes y transmite las cargas producidas durante la integración, lanzamiento y despliegue. Su geometría también establece las superficies en las que pueden instalarse sensores externos, por lo que la posición y alineación de un sensor de Sol deben relacionarse con el sistema de referencia utilizado por el vehículo.

El sistema de potencia eléctrica administra la generación y distribución de energía. Su interacción con el sensor de Sol puede presentarse de dos maneras: como fuente de alimentación del instrumento y, dependiendo de la misión, mediante el empleo de la dirección solar para orientar superficies de generación fotovoltaica.

La computadora de a bordo concentra diferentes funciones de supervisión y procesamiento. Sin embargo, la ejecución de los algoritmos correspondientes al sistema de determinación y control de orientación puede realizarse en la computadora principal, en una unidad específica o distribuirse entre diferentes dispositivos. Esta característica resulta relevante para el presente trabajo, ya que la arquitectura desarrollada incorpora procesamiento local dentro del propio sensor.

El subsistema de telecomunicaciones permite el intercambio de información entre el vehículo y el segmento terreno. Determinadas misiones pueden requerir controlar la orientación para mantener una geometría favorable del enlace, aunque esta condición depende del tipo de antena y de los requerimientos de cada misión.

El control térmico administra los intercambios de calor y las temperaturas de operación de los componentes. En los sensores fotosensibles esta variable puede modificar la responsividad del detector, la corriente oscura y los parámetros de los circuitos de acondicionamiento, por lo que sus efectos deben considerarse durante la caracterización del instrumento.

La carga útil establece la función particular del vehículo y puede imponer requerimientos de orientación cuando necesita observar una dirección determinada. Sin embargo, dichos requerimientos no son iguales para todas las misiones y deben derivarse de la función del instrumento correspondiente.

De estos subsistemas, el sistema de determinación y control de orientación se relaciona directamente con el sensor desarrollado en esta tesis, debido a que utiliza mediciones obtenidas mediante diferentes instrumentos para estimar la orientación del vehículo. Por esta razón, las siguientes secciones se concentran en su estructura funcional y en las fuentes de información utilizadas durante el proceso de determinación.

| Subsistema | Función general |
|---|---|
| **Estructura** | Proporcionar soporte mecánico, interfaces de integración y transferencia de cargas durante lanzamiento y operación. |
| **Sistema de potencia eléctrica** | Generar, almacenar, acondicionar y distribuir la energía requerida por el vehículo. |
| **Computadora de a bordo** | Ejecutar las funciones de supervisión, manejo de datos, comandos y coordinación de los subsistemas. |
| **Telecomunicaciones** | Establecer los enlaces necesarios para transmisión de telemetría, recepción de comandos y transferencia de datos. |
| **Control térmico** | Mantener los componentes dentro de los intervalos de temperatura definidos para su operación. |
| **Carga útil** | Ejecutar la función particular asociada con el objetivo científico, tecnológico o de servicio de la misión. |
| **Sistema de determinación y control de orientación** | Estimar la orientación y el movimiento rotacional del vehículo y generar acciones para modificar o mantener su orientación. |

**Tabla 1.1.** Función general de los principales subsistemas considerados en una plataforma CubeSat.

## 1.3 Sistema de determinación y control de orientación

La orientación de un vehículo espacial describe la relación rotacional entre un sistema de coordenadas fijo a su cuerpo y un sistema de referencia externo. Esta relación puede representarse mediante diferentes herramientas matemáticas, entre ellas matrices de rotación, ángulos de Euler o cuaterniones [3], [4]. Su selección depende del análisis realizado y de las características del algoritmo empleado.

El sistema de determinación y control de orientación integra las funciones necesarias para estimar esta relación y, cuando la misión lo requiere, modificar el movimiento rotacional del vehículo mediante actuadores. Aunque ambas funciones se encuentran relacionadas dentro del mismo sistema, es conveniente diferenciarlas debido a que la determinación produce una estimación del estado, mientras que el control genera acciones físicas sobre el vehículo [3], [4].

Desde el punto de vista funcional, las mediciones proporcionadas por los sensores se utilizan para estimar el estado de orientación del vehículo. Esta estimación se compara posteriormente con una referencia u orientación objetivo y, cuando se requiere modificar el estado del vehículo, el sistema de control genera los comandos correspondientes para los actuadores. La relación general entre estas funciones se presenta en la Figura 1.3.

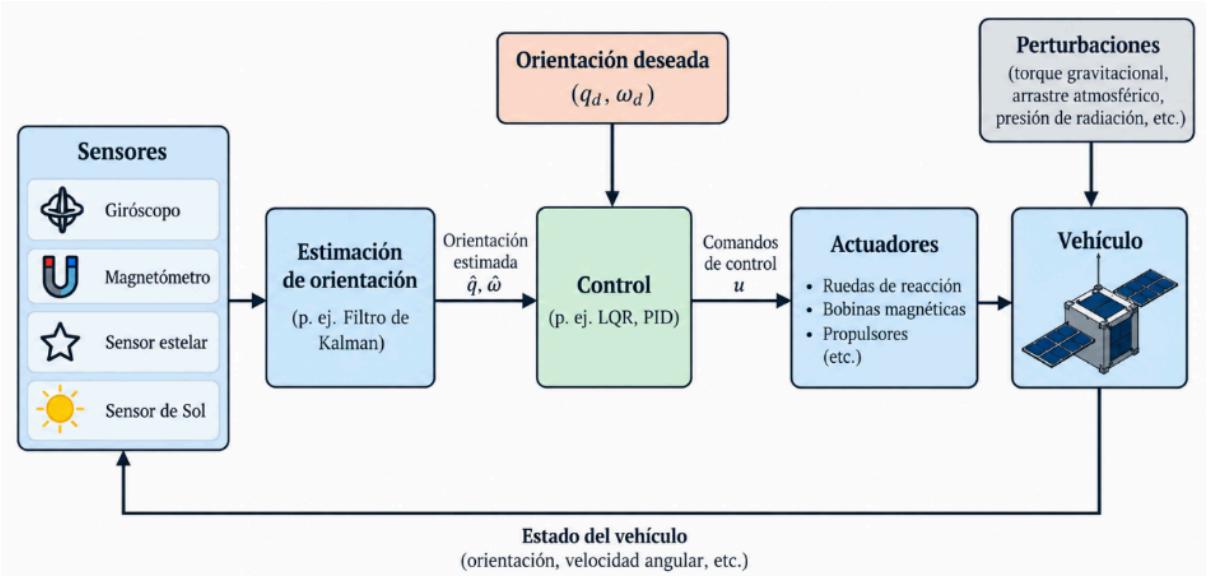



**Figura 1.3**. Diagrama funcional del sistema de determinación y control de orientación: sensores, estimación de orientación, control, actuadores y respuesta dinámica del vehículo. Elaboración propia a partir de [2]-[4].

### 1.3.1 Determinación de orientación

La determinación de orientación consiste en estimar la relación entre el sistema de referencia fijo al vehículo y una referencia externa. Para realizar esta estimación se utilizan mediciones provenientes de diferentes sensores y, cuando es necesario, modelos que permiten expresar las referencias físicas en un sistema de coordenadas conocido [3], [4].

Una referencia externa puede estar constituida por el vector del campo magnético terrestre, la dirección del Sol, la geometría de la Tierra o las posiciones aparentes de estrellas conocidas. Estas mediciones no proporcionan necesariamente una solución completa de orientación por sí mismas. La cantidad de información disponible depende del número de referencias independientes, de la geometría entre ellas y del tipo de sensor empleado.

Los sensores inerciales proporcionan una información diferente. Un giróscopo mide el movimiento angular del vehículo y permite propagar una estimación entre observaciones de referencias externas. Sin embargo, los errores de sesgo y ruido producen una acumulación progresiva de error cuando su señal se integra en el tiempo, por lo que es frecuente combinar información inercial con mediciones de referencia [4], [5].

En consecuencia, la determinación de orientación puede entenderse como un proceso en el que diferentes mediciones se relacionan con modelos o referencias conocidas para obtener una representación matemática del estado rotacional del vehículo.

### 1.3.2 Control de Orientación

El control de orientación utiliza la estimación del estado para modificar o mantener la orientación del vehículo respecto a una condición objetivo. Para ello se determina el error entre la orientación deseada y la estimada y, mediante una ley de control, se generan comandos para los actuadores [2]-[4].

Entre los actuadores utilizados en satélites pequeños se encuentran los magnetopares y las ruedas de reacción. Los magnetopares generan un momento dipolar que interactúa con el campo magnético terrestre, mientras que las ruedas de reacción intercambian momento angular con el cuerpo del satélite. Otras arquitecturas pueden utilizar propulsores u otros dispositivos cuando la misión lo requiere [4], [5].

La selección de los actuadores y de la ley de control depende de los pares perturbadores esperados, la maniobra requerida, la precisión de apuntamiento y los recursos disponibles. Por tanto, no existe una asociación directa entre el tamaño de un CubeSat y una configuración determinada de control.

### 1.3.3 Elementos funcionales del sistema

Desde un punto de vista funcional, el sistema de determinación y control de orientación puede dividirse en sensores, procesamiento, algoritmos de estimación, leyes de control y actuadores. Los sensores proporcionan mediciones de magnitudes físicas; el sistema de estimación las transforma en información del estado; el controlador calcula una acción a partir del error respecto a la referencia deseada; finalmente, los actuadores producen el par necesario para modificar el movimiento del vehículo.

La implementación de estas funciones puede concentrarse en una unidad dedicada o distribuirse entre diferentes elementos de la aviónica. En sistemas de pequeñas dimensiones es común encontrar unidades integradas que combinan magnetómetros, sensores de Sol, giróscopos, sensores estelares y actuadores con procesamiento local [5].

Durante una misión también pueden establecerse diferentes modos de operación. Entre ellos pueden encontrarse la reducción inicial de velocidad angular después del despliegue, adquisición de una referencia solar, apuntamiento hacia la Tierra o mantenimiento de una orientación inercial. La presencia y secuencia de estos modos depende del concepto de operación de cada misión y no constituye una característica obligatoria del estándar CubeSat.

Para el sensor desarrollado en este trabajo, la función relevante se encuentra en la etapa de determinación: el instrumento proporciona una estimación de la dirección solar respecto a su propio sistema de referencia. Esta información puede utilizarse posteriormente por un sistema de estimación junto con otras mediciones disponibles.

## 1.4 Sensores utilizados para la determinación de orientación

Los sensores empleados durante la determinación no proporcionan necesariamente la misma magnitud física. Los giróscopos permiten obtener información de la velocidad angular del vehículo, mientras que otros instrumentos proporcionan referencias respecto al entorno, como la dirección del campo magnético terrestre, el horizonte, las estrellas o el Sol. Esta diferencia se representa de manera esquemática en la Figura 1.4. La combinación de estas mediciones permite estimar la orientación y su evolución temporal [4], [5].

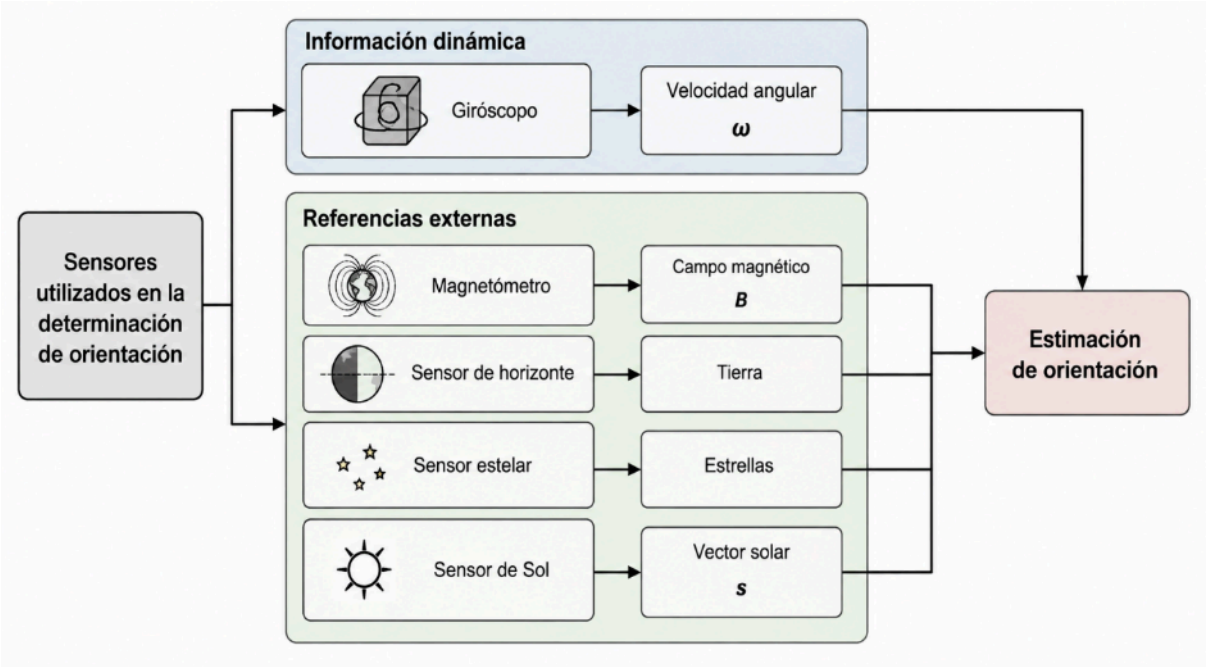



**Figura 1.4.** Diferenciación funcional entre sensores de velocidad angular y sensores que proporcionan referencias externas para la determinación de orientación. Elaboración propia a partir de [3] y [4].

Esta diferenciación resulta necesaria debido a que un sensor no debe atribuirse directamente la función del sistema completo. Un giróscopo mide velocidad angular, un magnetómetro mide un campo magnético y un sensor de Sol determina una dirección asociada con la radiación incidente. La orientación se obtiene posteriormente a partir del procesamiento de estas mediciones y de las referencias correspondientes.

### 1.4.1 Giróscopos

Los giróscopos utilizados en aplicaciones espaciales proporcionan una medición relacionada con la velocidad angular del vehículo. En unidades de medición inercial pueden disponerse tres elementos ortogonales para obtener las componentes de este vector respecto al sistema de referencia del sensor [4], [5].

Su principal ventaja dentro del proceso de determinación es la disponibilidad continua de información dinámica, incluso cuando una referencia externa queda temporalmente fuera del campo de visión. Sin embargo, la integración de la velocidad angular también integra los errores de sesgo y ruido, produciendo una deriva en la orientación estimada. Por esta razón, la información de los giróscopos suele combinarse con sensores de referencia externa.

### 1.4.2 Magnetómetros

Un magnetómetro mide las componentes del campo magnético local. Cuando la dirección esperada del campo terrestre puede calcularse mediante un modelo geomagnético y se conoce la posición del vehículo, la comparación entre el vector medido y el vector de referencia proporciona información utilizable para la determinación de orientación [4], [5].

La medición puede verse modificada por campos generados dentro del propio satélite, incluyendo corrientes eléctricas, actuadores magnéticos y materiales con propiedades ferromagnéticas. Por esta razón, la localización, calibración y compatibilidad electromagnética del magnetómetro forman parte del proceso de integración.

### 1.4.3 Sensores de horizonte

Los sensores de horizonte utilizan la Tierra como referencia y detectan características relacionadas con el limbo o con la distribución radiométrica del planeta. Dependiendo de la región espectral y de la arquitectura del instrumento, pueden utilizar contrastes entre la Tierra y el espacio circundante para obtener información respecto a la dirección del planeta [3]-[5].

Su operación depende de la geometría orbital, el intervalo geométrico ideal y las condiciones de detección. La información obtenida puede utilizarse como una referencia externa, pero el desempeño final depende de la implementación particular del sensor.

### 1.4.4 Sensores estelares

Los sensores estelares obtienen imágenes de un conjunto de estrellas y comparan las posiciones observadas con un catálogo almacenado. A partir de la correspondencia entre los patrones observados y conocidos es posible obtener una solución de orientación tridimensional [4], [5].

La exactitud alcanzable depende del sistema óptico, el detector, el algoritmo de identificación y las condiciones de operación. El movimiento angular del vehículo, fuentes luminosas externas y la presencia de luz parásita pueden afectar la adquisición. Debido a estas condiciones, su integración requiere mantener una línea de vista adecuada y considerar los recursos de procesamiento necesarios.

### 1.4.5 Sensores de Sol

Los sensores de Sol determinan la dirección de la radiación solar respecto al sistema de referencia del instrumento. Dependiendo de su arquitectura, la dirección puede obtenerse a partir de la intensidad medida por uno o varios elementos fotosensibles, de diferencias entre señales o de la posición de una imagen o patrón proyectado sobre un detector [3], [5].

Un vector solar unitario proporciona una referencia externa, pero no determina por sí mismo la orientación completa en tres ejes. Para obtener una solución tridimensional instantánea se requiere al menos otra referencia independiente o información adicional proporcionada mediante otros sensores y un procedimiento de estimación [4], [5].

### 1.4.6 Comparación funcional

La Tabla 1.2 resume las diferencias principales entre los sensores descritos. La comparación se realiza de acuerdo con la magnitud física que proporcionan y no mediante un único valor denominado precisión, debido a que las métricas correspondientes a cada instrumento son diferentes.

| Sensor | Magnitud medida | Referencia | Información aportada | Limitación característica |
|---|---|---|---|---|
| Giróscopo | Velocidad angular ω | Inercial/local | Evolución temporal del movimiento rotacional | Sesgo, ruido y deriva al integrar |
| Magnetómetro | Campo magnético B | Campo geomagnético | Vector externo de referencia | Perturbaciones magnéticas locales y dependencia de un modelo |
| Sensor de horizonte | Dirección/geometría del limbo | Tierra | Referencia respecto al planeta | Geometría y condiciones de detección |
| Sensor estelar | Direcciones estelares | Catálogo de estrellas | Solución de orientación basada en referencias estelares | Luz parásita, velocidad angular, óptica y procesamiento |
| Sensor de Sol | Dirección solar | Sol | Vector externo de referencia | Campo de visión, eclipse, albedo, reflejos y condiciones de iluminación |

**Tabla 1.2.** Información proporcionada por sensores utilizados durante la determinación de orientación.

La comparación permite observar que los sensores son complementarios. No resulta adecuado establecer una jerarquía general entre ellos, ya que su selección depende de la información requerida, las condiciones de operación y los recursos de la misión.

## 1.5 Sensores de Sol

El sensor de Sol constituye un caso particular de sensor de referencia externa. Su función consiste en determinar la dirección de los rayos solares respecto a un sistema de coordenadas fijo al instrumento. La salida puede expresarse mediante una o dos coordenadas angulares, componentes normalizadas o directamente mediante un vector unitario, dependiendo de la arquitectura y del procesamiento implementado [3], [5].

El principio de medición puede implementarse mediante diferentes configuraciones. Existen sensores basados en la respuesta de uno o varios elementos fotosensibles, arreglos diferenciales, detectores de cuadrante, arreglos lineales ubicados detrás de una rendija y sistemas de imagen en los que se determina la posición de una proyección solar sobre un detector bidimensional [5], [8]-[11]. Algunas de estas configuraciones se representan de manera esquemática en la Figura 1.5.

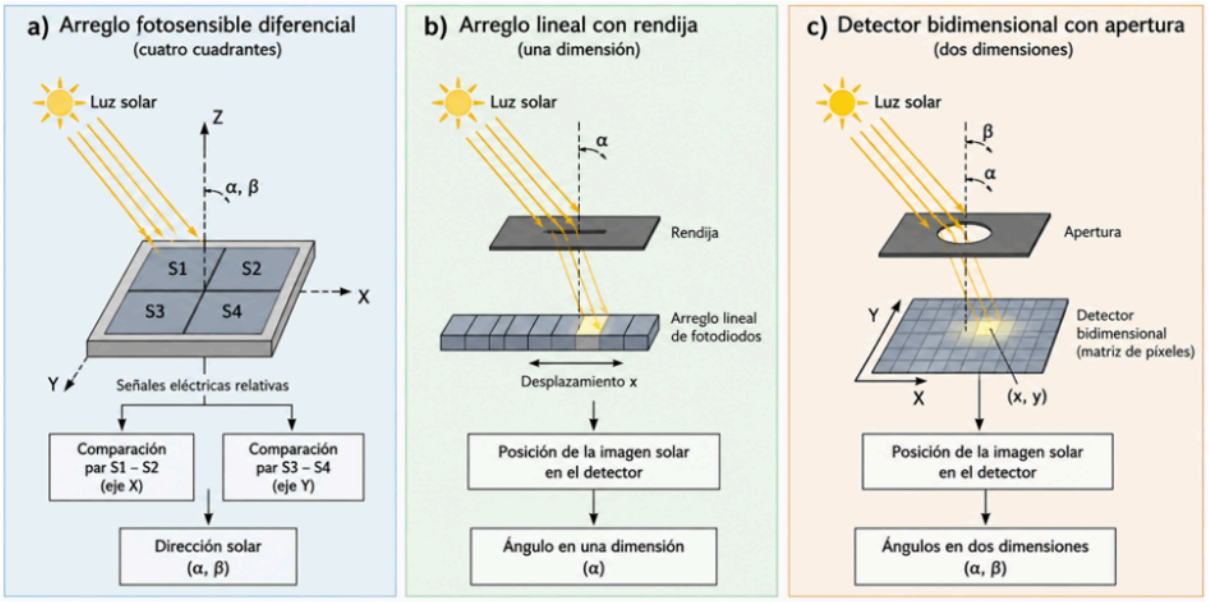



**Figura 1.5.** Configuraciones representativas utilizadas para la determinación de la dirección solar: a) respuesta fotosensible diferencial, b) arreglo lineal con rendija y c) detector bidimensional con apertura. Elaboración propia a partir de [5], [9] y [10].

### 1.5.1 Función del sensor de Sol

Sea $S_S$ el vector unitario expresado en el sistema de referencia del sensor. El objetivo del instrumento consiste en obtener información suficiente para determinar la dirección de este vector dentro de su campo de visión. Para un sensor de dos ejes, la dirección puede expresarse mediante dos ángulos independientes respecto al eje normal del instrumento; a partir de ellos puede construirse posteriormente el vector unitario correspondiente.

La medición se encuentra referida inicialmente al marco del sensor. Para emplearla dentro del vehículo debe conocerse la transformación geométrica entre este marco y el sistema de referencia fijo al satélite. Por esta razón, los errores de montaje y alineación también pueden convertirse en errores en el vector unitario calculado, aun cuando la respuesta interna del instrumento haya sido calibrada.

### 1.5.2 Aplicaciones dentro del sistema de orientación

La dirección solar puede utilizarse en diferentes funciones dependiendo del concepto de operación. Una de ellas consiste en proporcionar una referencia durante procedimientos de adquisición solar, en los que se busca conocer la posición aparente del Sol respecto al vehículo. Esta información puede emplearse posteriormente para orientar superficies o instrumentos hacia una dirección determinada.

Otra aplicación consiste en utilizar el vector unitario como una de las entradas de un algoritmo de estimación. Su combinación con una segunda referencia no colineal, como el vector geomagnético, permite obtener información adicional de orientación mediante algoritmos de determinación vectorial [3], [4].

Los sensores de Sol también pueden formar parte de estrategias de recuperación o contingencia cuando la misión ha sido diseñada para utilizar una referencia solar en esas

condiciones. Sin embargo, esta función depende de la arquitectura del sistema completo y no constituye una propiedad inherente del sensor analógico.

### 1.5.3 Sensores burdos y finos

Los términos coarse Sun sensor y fine Sun sensor se utilizan para diferenciar instrumentos de acuerdo con el nivel de desempeño requerido y su función dentro de una misión. Los sensores burdos proporcionan una estimación aproximada de la dirección solar y suelen emplearse cuando se prioriza un intervalo geométrico ideal amplio o una arquitectura sencilla. Los sensores finos se diseñan para obtener una incertidumbre angular menor mediante una geometría, detector, procesamiento y calibración de mayor exigencia [3], [5].

Esta clasificación no establece fronteras universales de campo de visión o error angular. Un valor considerado suficiente para una misión puede resultar inadecuado para otra. De igual manera, la clasificación burdo/fino es independiente de la clasificación analógico/digital: pueden existir sensores analógicos con desempeño angular reducido o elevado, así como diferentes arquitecturas digitales.

### 1.5.4 Sensores de Sol analógicos

En una arquitectura analógica, la información inicial se obtiene a partir de magnitudes eléctricas continuas generadas por uno o varios elementos fotosensibles. Un caso sencillo corresponde a una celda cuya corriente presenta una dependencia aproximadamente cosenoidal con el ángulo de incidencia. Al distribuir varios elementos sobre diferentes superficies puede estimarse la dirección solar a partir de la relación entre sus señales [5].

Otra configuración utiliza varios elementos sobre un mismo plano y una geometría que produce diferencias de iluminación en función de la dirección incidente. Para un arreglo de cuatro elementos, las señales de pares opuestos pueden combinarse mediante diferencias y sumas con la finalidad de obtener variables relacionadas con dos ejes angulares.

El término analógico no implica que todo el procesamiento posterior se realice mediante electrónica analógica. Las señales pueden acondicionarse, digitalizarse mediante un convertidor analógico-digital y ser procesadas localmente por un microcontrolador. En este caso, el principio de detección permanece basado en las amplitudes de las señales fotosensibles, aunque la salida final del instrumento pueda entregarse mediante una interfaz digital.

Las relaciones normalizadas entre señales presentan una ventaja particular cuando existe una componente multiplicativa común. Por ejemplo, una diferencia dividida entre la suma de dos canales puede reducir la dependencia respecto a cambios comunes de irradiancia. Sin embargo, esta operación no elimina errores producidos por diferencias de responsividad entre detectores, ganancia, offset, saturación, temperatura, desalineación o iluminación no uniforme. Estas condiciones deben tratarse mediante diseño y calibración.

### 1.5.5 Sensores de Sol digitales

El término sensor de Sol digital se utiliza para diferentes arquitecturas en las que la dirección se obtiene mediante información espacial discretizada o mediante patrones codificados. Una configuración utiliza una abertura o rendija y un conjunto de elementos detectores. La posición o patrón de iluminación permite relacionar la respuesta con el ángulo de incidencia [5].

Los detectores bidimensionales permiten obtener una imagen de la proyección solar sobre un plano. Cuando se conoce la separación entre la abertura y el detector, la posición del punto o centroide puede relacionarse geométricamente con dos coordenadas angulares. En estas arquitecturas se utilizan detectores CCD, CMOS o dispositivos de píxel activo, además de los algoritmos necesarios para localizar la región iluminada y compensar las distorsiones del sistema óptico [8], [10].

También existen sensores basados en máscaras codificadas en los que un conjunto de fotodiodos genera un patrón asociado con la dirección solar [5]. Por esta razón, digital no debe utilizarse como sinónimo exclusivo de cámara ni analógico como sinónimo de sensor de baja precisión.

La comparación entre ambas familias debe realizarse mediante parámetros medibles: campo de visión, error angular, número de ejes, tiempo de actualización, consumo, masa, dimensiones, procesamiento, interfaz y condiciones de operación. La clasificación por sí sola no permite predecir estos parámetros.

### 1.5.6 Fuentes de error y limitaciones

La respuesta de un sensor de Sol depende de la interacción entre la geometría, los elementos fotosensibles y la electrónica de adquisición. Una primera fuente de error corresponde a las diferencias de responsividad entre detectores. Incluso elementos del mismo tipo pueden presentar variaciones, por lo que un arreglo diferencial requiere caracterizar el balance entre canales.

Los circuitos electrónicos introducen errores adicionales relacionados con offset, ganancia, ruido y resolución de conversión. Cuando se utilizan cocientes normalizados, un offset diferente entre canales puede modificar la respuesta especialmente cuando la señal total es reducida. De igual forma, la saturación de cualquier etapa invalida la relación esperada entre irradiancia y señal eléctrica.

La temperatura puede modificar la responsividad de los elementos fotosensibles, la corriente oscura y los parámetros de los circuitos analógicos. Cuando todos los elementos presentan variaciones semejantes, la normalización puede reducir parte del efecto común; sin embargo, un gradiente térmico o una diferencia individual entre canales produce un error que no se cancela necesariamente.

También deben considerarse efectos ópticos y geométricos. Las reflexiones sobre superficies cercanas, el albedo de la Tierra, el sombreado parcial y otras fuentes luminosas dentro del intervalo geométrico ideal pueden alterar la distribución esperada de irradiancia

[5]. Estas contribuciones deben evaluarse en función de la ubicación del sensor, su campo de visión y las condiciones de iluminación utilizadas durante la calibración.

Finalmente, el instrumento sólo puede proporcionar una medición cuando el Sol se encuentra dentro de su campo de visión y se cumplen las condiciones de iluminación necesarias. Durante un eclipse orbital la referencia solar deja de estar disponible, por lo que el sistema de determinación debe recurrir a otras fuentes de información.

## 1.6 Revisión bibliográfica de sensores de Sol para nanosatélites

En esta sección se revisan desarrollos académicos y dispositivos comerciales utilizados o propuestos para plataformas espaciales de pequeñas dimensiones. La comparación se concentra en el principio de detección, número de ejes, campo de visión, desempeño angular y arquitectura de procesamiento reportados. El propósito no consiste en identificar una configuración universalmente superior, sino en reconocer las alternativas empleadas y los compromisos de diseño que permitan contextualizar la arquitectura desarrollada en este trabajo.

### 1.6.1 Desarrollos académicos

Buonocore, Grassi y Rufino desarrollaron un sensor miniaturizado basado en un detector de píxeles activos ubicado detrás de un sistema de apertura. El trabajo incluyó el desarrollo del prototipo y un modelo numérico destinado a simular su operación; los resultados numéricos reportaron la posibilidad de alcanzar una exactitud angular inferior a un minuto de arco [8]. Este caso representa una arquitectura en la que la medición se obtiene a partir de la posición de una proyección sobre un detector bidimensional.

Antonello, Olivieri y Francesconi desarrollaron un sensor basado en una cámara CMOS comercial y una abertura circular de 10 μm. La posición del punto luminoso sobre el detector se relacionó mediante un modelo geométrico con los ángulos de incidencia. El prototipo reportó un campo de visión de 66.2° × 51.1° y una resolución teórica de aproximadamente 0.026°, además de una campaña experimental para comparar la respuesta con el modelo [9].

Post, Li y Lee compararon dos métodos de sensado solar orientados a plataformas CubeSat y vehículos de pequeñas dimensiones. El primero utilizó un arreglo lineal de 256 fotodiodos ubicado detrás de una rendija, mientras que el segundo estimó el ángulo mediante las corrientes producidas por paneles solares colocados en diferentes caras. Durante las pruebas, el arreglo lineal presentó errores máximos aproximados de ±5°, mientras que el método basado en corrientes solares presentó valores aproximados de ±7° y requirió mayor filtrado [10]. El arreglo se muestra en la figura 1.6.

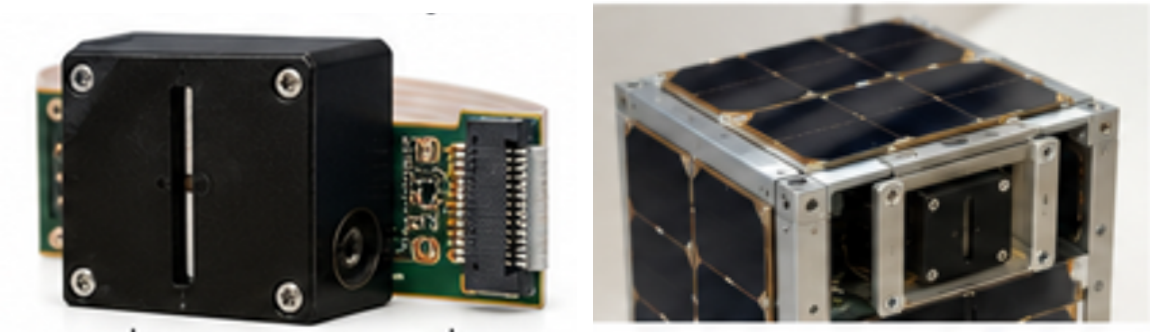


**Figura 1.6.** Prototipo de sensor de Sol basado en un arreglo lineal de 256 fotodiodos y una máscara con rendija, integrado en una plataforma CubeSat para su caracterización experimental. Tomado de Post et al. [10], licencia CC BY 4.0.

Más recientemente, Anger et al. desarrollaron y sometieron a pruebas de calificación dos sensores abiertos para CubeSat: una arquitectura analógica y una digital. El sensor analógico reportó una precisión mejor que 5° sobre un campo de visión de 100°, mientras que el digital, basado en una abertura fabricada fotolitográficamente, reportó una precisión mejor que 0.5° sobre 36°. El trabajo incluyó además calibración y pruebas de temperatura, vibración y radiación [11].

| Desarrollo | Principio | Información reportada | Aspecto relevante |
|---|---|---|---|
| Buonocore et al. (2005) | APS bidimensional + apertura | Modelo numérico con desempeño angular inferior a 1 arcmin | Relación entre posición de imagen y dirección solar |
| Post et al. (2013) | Arreglo lineal + rendija | Error aprox. ±5° | Arquitectura lineal y procesamiento de posición |
| Post et al. (2013) | Corriente de paneles solares | Error aprox. ±7° | Uso de elementos fotovoltaicos distribuidos |
| Antonello et al. (2018) | CMOS + pinhole | FOV 66.2° × 51.1°; resolución teórica 0.026° | Sensor digital compacto basado en componente comercial |
| Anger et al. (2026), PSS | Sensor analógico | Precisión < 5°; FOV 100° | Diseño abierto y pruebas ambientales |
| Anger et al. (2026), DSS | Sensor digital + apertura | Precisión < 0.5°; FOV 36° | Mayor desempeño angular con campo de visión menor |

**Tabla 1.3.** Desarrollos académicos representativos de sensores de Sol para plataformas pequeñas.

Los casos revisados muestran que la arquitectura de un sensor de Sol puede resolverse mediante principios físicos diferentes. También muestran que un menor error angular puede acompañarse de una geometría y procesamiento de mayor complejidad o de un intervalo geométrico ideal diferente. Por esta razón, la selección debe relacionarse con los requerimientos particulares del instrumento.

### 1.6.2 Dispositivos comerciales

La disponibilidad comercial permite observar una situación semejante. Existen sensores analógicos y digitales con campos de visión y desempeños que se superponen, por lo que no puede establecerse que una de las dos familias presente de manera general menor consumo, menor masa o mayor precisión [5].

El nanoSSOC-A60 de Solar MEMS utiliza una interfaz analógica y realiza medición en dos ejes ortogonales con un campo de visión de ±60°. El fabricante reporta una exactitud inferior a 0.5° a 3σ, una precisión inferior a 0.1° y una masa aproximada de 4 g [12].

La versión nanoSSOC-D60 utiliza una interfaz digital e incorpora procesamiento para proporcionar directamente los ángulos solares mediante UART, I²C o SPI. La especificación reporta igualmente dos ejes, un campo de visión de ±60°, exactitud inferior a 0.5° a 3σ y precisión inferior a 0.1° [13].

El CSS10 de Tensor Tech corresponde a un sensor analógico burdo de un eje basado en un fotodiodo. Su documentación reporta un campo de visión de ±60°, una exactitud de aproximadamente ±10° y una masa inferior a 0.5 g [14].

CubeSpace utiliza una arquitectura diferente en el CubeSense Sun. El instrumento emplea un detector CMOS y procesamiento integrado, con un campo de visión horizontal y vertical reportado de 166°, un campo diagonal de 176° y una exactitud de 0.2° a 2σ [15].

Las soluciones comerciales disponibles permiten observar que una misma función de medición puede implementarse mediante arquitecturas diferentes. En la Figura 1.7 se presentan ejemplos físicos de sensores burdos y finos con interfaces analógicas y digitales, incluyendo una arquitectura basada en detector CMOS. Las diferencias visibles en tamaño, encapsulado y apertura óptica corresponden a soluciones de detección y procesamiento distintas, por lo que la clasificación analógica o digital no debe utilizarse como único indicador de desempeño.




**Figura 1.7.** a) sensor burdo analógico TensorCSS-10; b) sensor de dos ejes con interfaz analógica nanoSSOC-A60; c) sensor de dos ejes con procesamiento e interfaz digital nanoSSOC-D60; y d) sensor fino basado en detector CMOS CubeSense Sun Gen 2. Fuentes: Tensor Tech, Solar MEMS Technologies y CubeSpace [12]–[15].

Los valores de la tabla 1.4 que se muestran a continuación, corresponden a las métricas y condiciones reportadas por cada fabricante, por lo que no deben interpretarse como resultados obtenidos mediante un procedimiento de ensayo común. En particular, los términos exactitud y precisión, así como el nivel estadístico utilizado, deben conservarse al comparar dispositivos.

| Dispositivo | Arquitectura / interfaz | Ejes | Campo de visión | Desempeño reportado |
|---|---|---|---|---|
| Solar MEMS nanoSSOC-A60 | Analógica | 2 | ±60° por eje | Exactitud < 0.5° (3σ); precisión < 0.1° |
| Solar MEMS nanoSSOC-D60 | Digital, UART/I²C/SPI | 2 | ±60° por eje | Exactitud < 0.5° (3σ); precisión < 0.1° |
| Tensor Tech CSS10 | Analógica, fotodiodo | 1 | ±60° | Exactitud aprox. ±10° |
| CubeSpace CubeSense Sun | CMOS + procesamiento integrado | 2 | 166° H/V; 176° diagonal | Exactitud 0.2° (2σ) |

**Tabla 1.4.** Dispositivos comerciales representativos de sensores de Sol.

### 1.6.3 Comparación de configuraciones

La revisión bibliográfica muestra que las clasificaciones analógica y digital no determinan de manera independiente el desempeño de un sensor. Un ejemplo directo se encuentra en las versiones A60 y D60 de Solar MEMS: ambas presentan nominalmente el mismo intervalo geométrico ideal y desempeño angular, mientras que difieren principalmente en la forma de acceso y procesamiento de la información [12], [13].

De manera semejante, los sensores analógicos pueden abarcar desde elementos individuales utilizados para obtener una referencia burda hasta configuraciones diferenciales o de cuadrante con mejor resolución angular. Los digitales incluyen desde arreglos lineales y máscaras codificadas hasta sensores CMOS que calculan la posición de una imagen solar.

Por tanto, la selección de una arquitectura requiere analizar conjuntamente el número de ejes, el campo de visión, la relación entre la señal y el ángulo, la electrónica requerida, el procedimiento de calibración y las condiciones de integración. El principio de detección constituye una parte de este proceso, pero no sustituye la evaluación del instrumento completo.

## 1.7 Síntesis y criterios para el desarrollo

A partir de los fundamentos revisados se establece que el sensor de Sol proporciona una referencia direccional que puede utilizarse dentro del proceso de determinación de orientación, pero que no constituye por sí mismo una solución completa de orientación tridimensional. Su desempeño debe evaluarse a partir de la dirección solar que puede estimar dentro de su intervalo geométrico ideal y de los errores asociados con la geometría, los detectores, la electrónica y el procesamiento.

La revisión de arquitecturas muestra que existen soluciones basadas en intensidades fotosensibles, arreglos diferenciales, máscaras, detectores lineales y sistemas de imagen. La clasificación analógica o digital no establece por sí misma una ventaja general de desempeño, por lo que la selección debe relacionarse con los requerimientos y recursos de la aplicación.

Para el desarrollo presentado en esta tesis se considera una arquitectura basada en cuatro elementos fotosensibles dispuestos en cruz, cuyas señales son adquiridas y procesadas localmente. La estimación angular utiliza relaciones diferenciales normalizadas entre los elementos opuestos, con la finalidad de reducir la dependencia frente a

variaciones comunes de irradiancia. Sin embargo, el comportamiento final depende de las características reales del arreglo y debe determinarse mediante calibración y pruebas experimentales.

A partir de este punto, el siguiente capítulo desarrolla los principios físicos asociados con la radiación solar, la conversión fotoeléctrica y la geometría de detección utilizada por el instrumento. Posteriormente, estas relaciones se emplean para establecer el modelo matemático que vincula las señales adquiridas con la dirección solar.

Capítulo

# II

# Fundamentos y condiciones de operación del sensor de Sol analógico

En este capítulo se establecen los fundamentos físicos y funcionales utilizados para definir el principio de medición del sensor de Sol analógico. A partir del contexto presentado en el capítulo anterior, se describe el sistema de referencia local del instrumento y las componentes angulares empleadas para representar la dirección solar, así como los requerimientos necesarios para realizar la medición sobre dos ejes.

Posteriormente se revisan las configuraciones aplicables al principio de detección y se establece la arquitectura utilizada en este trabajo, basada en cuatro elementos fotosensibles dispuestos en cruz y una apertura que modifica la distribución de iluminación en función del ángulo de incidencia. Se desarrollan también las relaciones físicas correspondientes a la conversión de irradiancia en señal eléctrica y el procesamiento diferencial normalizado utilizado para obtener variables relacionadas con las componentes angulares.

Finalmente, se identifican las principales condiciones que pueden modificar la respuesta del instrumento y se establecen los criterios utilizados posteriormente para evaluar su comportamiento, entre ellos el campo de visión, la sensibilidad, la resolución y el error angular. Estas definiciones proporcionan la base conceptual para el modelo paramétrico desarrollado en el Capítulo III, en el que la geometría y las relaciones de señal se expresan matemáticamente para analizar la respuesta esperada del sensor.

## 2.1 Fundamentos de la medición de la dirección solar

### 2.1.1 Sistema de referencia del sensor

Para determinar la dirección de incidencia solar se establece un sistema de referencia local asociado al instrumento. Se utiliza un sistema cartesiano ortogonal y dextrógiro definido por los ejes $x_S$, $y_S$ y $z_S$, cuyo origen se localiza en el centro geométrico del arreglo fotosensible. Los ejes $x_S$ y $y_S$ se encuentran contenidos en el plano fotosensible, mientras que $z_S$ corresponde a la dirección normal a la superficie del sensor y apunta hacia el exterior del instrumento. Esta definición permite describir la dirección solar de manera independiente de la orientación con la que posteriormente se instale el sensor en el nanosatélite.

La disposición del sistema de referencia y la representación de la dirección solar respecto al instrumento se muestran en la Figura 2.1. A partir de este marco se definen las componentes angulares utilizadas para describir la posición aparente del Sol dentro del intervalo geométrico ideal del sensor.

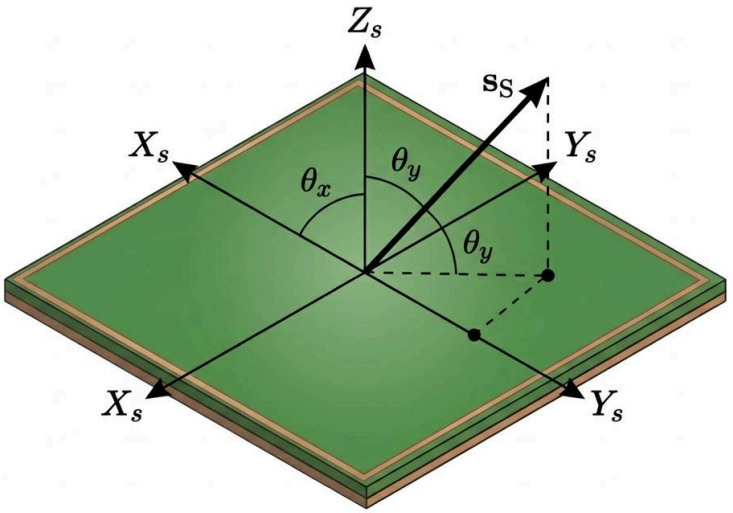



**Figura 2.1**. Sistema de referencia local del sensor y representación de la dirección solar mediante las componentes angulares $\theta_x$ y $\theta_y$.

Cuando el instrumento se integra al nanosatélite, la dirección obtenida en el sistema local puede expresarse respecto al marco del cuerpo mediante una transformación fija determinada por la orientación de montaje. Esta relación corresponde a una consideración de integración y no modifica el principio de medición desarrollado para el sensor.

### 2.1.2 Componentes angulares de la dirección solar

La posición aparente del Sol respecto al sensor se representa mediante una dirección definida a partir del origen del sistema local. Para describirla se utilizan dos componentes angulares, $\theta_x$ y $\theta_y$. El ángulo $\theta_x$ corresponde a la inclinación de la dirección solar observada sobre el plano $x_S z_S$, mientras que $\theta_y$ describe la inclinación equivalente sobre el plano $y_S z_S$. De esta forma, cada componente representa una variación de la dirección incidente respecto al eje normal sobre uno de los dos planos principales del instrumento.

Cuando la radiación incide en la dirección normal al plano fotosensible, ambas componentes angulares presentan un valor igual a cero. Una variación de $\theta_x$ modifica la dirección proyectada sobre el plano $x_S z_S$, mientras que una variación de $\theta_y$ produce el comportamiento correspondiente sobre el plano $y_S z_S$. El uso de estas dos componentes permite describir la dirección solar dentro del intervalo geométrico ideal del sensor sin requerir una tercera componente angular independiente.

### 2.1.3 Representación de la dirección solar

A partir de $\theta_x$ y $\theta_y$ se puede representar la dirección observada mediante un vector unitario expresado en el sistema de referencia del sensor. En este trabajo dicho vector se identifica

como $S_S$ y reúne la información angular utilizada para representar tridimensionalmente la dirección solar. La construcción matemática de sus componentes se desarrolla posteriormente dentro del modelo paramétrico.

La obtención de $S_S$ no implica determinar por sí sola la orientación completa del nanosatélite. El sensor proporciona una referencia de la dirección solar dentro de su campo de visión, mientras que la utilización de esta información junto con otras mediciones corresponde al sistema de determinación de orientación del vehículo. Por esta razón, el desarrollo se mantiene sobre las componentes angulares $\theta_x$ y $\theta_y$, así como sobre su representación mediante $S_S$.

## 2.2 Requerimientos funcionales para la medición

Con base en la definición de dirección solar establecida en la sección anterior, el instrumento debe proporcionar la información necesaria para determinar las componentes angulares $\theta_x$ y $\theta_y$. Estas variables describen la posición aparente del Sol respecto al sistema de referencia local y constituyen la base para representar posteriormente la dirección mediante el vector $S_S$.

La medición requiere dos componentes angulares, por lo que el sensor debe presentar sensibilidad ante variaciones de la dirección incidente sobre dos ejes ortogonales. Esta condición establece la necesidad de una arquitectura capaz de distinguir cambios asociados con $x_S$ y con $y_S$, sin definir todavía la disposición física de los elementos utilizados para realizar la medición.

El procesamiento de las señales se plantea de forma local, de manera que la información generada por el instrumento pueda transformarse en las variables angulares antes de ser utilizada por otros elementos del sistema. La forma específica en que se obtienen estas variables depende del principio de detección y de la configuración seleccionada posteriormente.

Los requerimientos funcionales establecidos para esta etapa se resumen en la Tabla 2.1. Estos se concentran únicamente en la función de medición y procesamiento del instrumento; los parámetros asociados con campo de visión, sensibilidad, resolución y error angular se consideran posteriormente como criterios de evaluación del desempeño.

| ID | Requerimiento funcional | Criterio |
|---|---|---|
| RF-01 | Medición angular | Determinar las componentes x y y de la dirección solar respecto al sistema de referencia del sensor |
| RF-02 | Número de ejes | Realizar la medición sobre dos ejes ortogonales |
| RF-03 | Procesamiento | Realizar localmente el procesamiento necesario para obtener las variables angulares |

**Tabla 2.1.** Requerimientos funcionales para la medición de la dirección solar.

En esta etapa no se establecen todavía el número de elementos fotosensibles, su disposición, la geometría de la máscara ni las características de la electrónica de adquisición. Estas decisiones dependen de la configuración seleccionada y se desarrollan en las secciones siguientes.

## 2.3 Configuraciones para la medición angular

Una vez establecidos los requerimientos funcionales, se consideran diferentes alternativas conceptuales que permiten transformar la dirección de incidencia solar en una variable medible. En todos los casos, el principio consiste en generar una respuesta que cambie cuando se modifica el ángulo de llegada de la radiación, aunque la forma de obtener esa variación depende de la disposición de los elementos fotosensibles y de los elementos geométricos utilizados.

Una primera configuración emplea detectores colocados con diferentes orientaciones. La respuesta de cada elemento depende del ángulo formado entre la radiación incidente y la normal de su superficie, por lo que las diferencias entre señales permiten obtener información sobre la dirección solar. Para realizar una medición sobre dos ejes se requiere disponer los detectores con orientaciones que permitan distinguir las variaciones asociadas con cada componente angular [3].

Otra configuración utiliza elementos fotosensibles coplanares y un elemento que modifica la distribución de iluminación sobre el plano fotosensible. Cuando cambia la dirección de incidencia, la región iluminada se desplaza y modifica de manera diferente la respuesta de los elementos. Este principio permite mantener los detectores sobre una misma superficie y trasladar la dependencia angular hacia la geometría formada entre el arreglo fotosensible y el elemento encargado de modular la iluminación [3].
Dentro de esta configuración pueden emplearse elementos opacos que generan regiones de sombra o máscaras que contienen una apertura por la que ingresa la radiación. En el caso de una apertura, la dirección incidente determina la posición de la región iluminada proyectada sobre el plano fotosensible. La relación entre el desplazamiento de esta región y el ángulo depende principalmente de la geometría de la apertura y de su separación respecto a los detectores.

También se considera una configuración formada por un arreglo lineal de elementos fotosensibles y una rendija. En este caso, el ángulo de incidencia se obtiene a partir de la posición de la región iluminada sobre el arreglo. Este principio constituye una alternativa válida para la medición angular y puede extenderse a dos ejes mediante una disposición bidimensional o mediante dos arreglos orientados sobre direcciones diferentes [10].

Las alternativas descritas se muestran de manera conceptual en la Figura 2.2. Su comparación considera la capacidad para obtener dos componentes angulares, la disposición de los elementos fotosensibles, la complejidad geométrica, la facilidad de integración y la posibilidad de relacionar la respuesta del instrumento con parámetros físicos que puedan incorporarse posteriormente al modelo matemático.

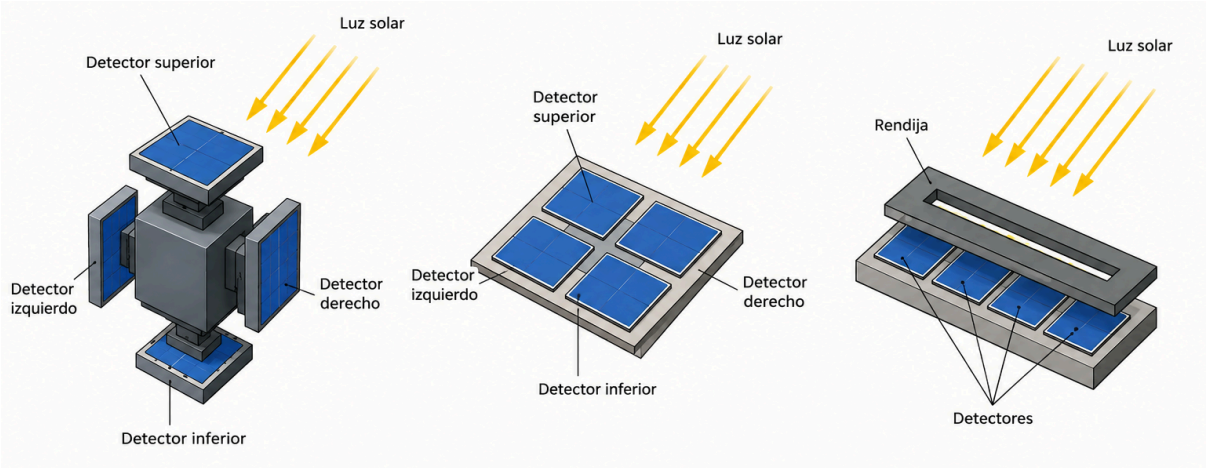



**Figura 2.2.** Configuraciones geométricas consideradas para la medición angular: a) detectores con diferentes orientaciones; b) elementos coplanares con modulación de la distribución de iluminación; c) arreglo lineal con rendija. Elaboración propia a partir de [3].

Las configuraciones analizadas permiten obtener información angular mediante principios geométricos diferentes. Para el prototipo desarrollado en este trabajo se selecciona una disposición coplanar con modulación de la iluminación mediante una máscara con apertura, debido a que permite realizar la medición sobre dos ejes dentro de una misma disposición geométrica y es compatible con el procesamiento diferencial considerado. La configuración seleccionada se desarrolla en la sección siguiente.

## 2.4 Selección de la configuración analógica con ventana

Tras revisar las alternativas conceptuales analizadas, para el prototipo desarrollado en este trabajo se selecciona una configuración coplanar formada por cuatro elementos fotosensibles y una máscara opaca con apertura. Esta disposición permite obtener información sobre dos ejes dentro de una misma geometría y es compatible con el procesamiento diferencial considerado para estimar la dirección solar.

Los elementos fotosensibles se distribuyen de manera ortogonal alrededor de una región central. Para mantener una nomenclatura consistente durante el desarrollo, se identifican como R para el elemento derecho, L para el izquierdo, U para el superior y D para el inferior. De esta forma, el par R-L se asocia con la componente correspondiente al eje $x_S$, mientras que el par U-D se utiliza para la componente relacionada con $y_S$.

Sobre el arreglo se coloca una máscara opaca con una apertura central alineada respecto al centro geométrico del sensor. En adelante, esta apertura también se identifica de manera breve como ventana cuando el contexto no produzca ambigüedad. Cuando la radiación incide aproximadamente en la dirección normal al plano fotosensible, la región iluminada se distribuye de manera simétrica respecto al arreglo. Al variar la dirección de incidencia, la proyección de la apertura se desplaza sobre el plano fotosensible y modifica de manera diferente el área iluminada de los elementos opuestos.

La configuración seleccionada se representa de manera conceptual en la Figura 2.3. En ella se muestran los elementos fotosensibles, la disposición de la máscara con apertura y la relación entre los pares empleados para obtener información sobre cada eje.

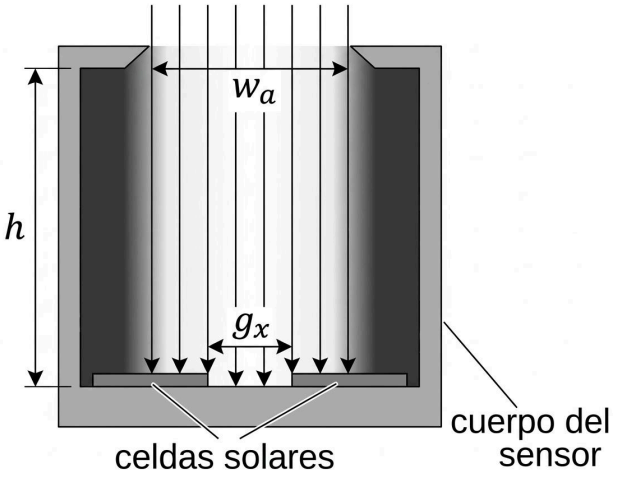



**Figura 2.3.** Configuración conceptual seleccionada para el sensor de Sol, formada por cuatro elementos fotosensibles coplanares y una máscara opaca con apertura. Elaboración propia a partir de [3] y [22]

La selección de esta arquitectura establece varias condiciones para el desarrollo posterior. Los elementos fotosensibles deben conservar una disposición simétrica respecto al centro del arreglo, la apertura debe mantener una posición definida respecto al plano fotosensible y la separación entre ambos planos debe permanecer controlada durante la integración. Asimismo, los canales asociados con cada elemento deben presentar características suficientemente comparables para que las diferencias de señal puedan relacionarse con cambios en la dirección incidente.

En esta etapa se define únicamente la arquitectura y las relaciones geométricas necesarias para su funcionamiento. Las dimensiones de los elementos fotosensibles, la apertura, las separaciones internas y la distancia entre la máscara y el plano fotosensible se incorporan posteriormente al modelo paramétrico para evaluar su influencia sobre la respuesta esperada del instrumento.

## 2.5 Fundamentos físicos de detección

La configuración seleccionada requiere relacionar la radiación incidente con una magnitud eléctrica que pueda ser adquirida y procesada. Para ello, la energía que atraviesa la apertura incide sobre los elementos fotosensibles y produce una respuesta que depende tanto de la irradiancia sobre el plano como del área iluminada de cada detector.

### 2.5.1 Irradiancia sobre el plano fotosensible

La radiación que alcanza el sensor puede describirse mediante la irradiancia $E_e$, definida como la potencia radiante recibida por unidad de área:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA},$$

donde $\Phi_e$ representa el flujo radiante incidente y A el área sobre la cual se distribuye.

Para las condiciones de iluminación consideradas se utiliza $E_{\odot}$ como irradiancia solar de referencia definida sobre un plano normal a la dirección de propagación [16]. Cuando la dirección incidente forma un ángulo $\theta$ respecto a la normal del plano fotosensible, la irradiancia efectiva sobre la superficie se expresa como:

$$E_{\theta} = E_{\odot} cos\theta. \tag{2.1}$$

El ángulo $\theta$ representa el ángulo espacial entre la dirección solar y el eje normal $z_S$, por lo que no constituye una tercera componente angular independiente de $\theta_x$ y $\theta_y$ [2]-[4].

Para incidencia normal, la irradiancia efectiva alcanza su valor máximo. Conforme aumenta el ángulo de incidencia, la componente recibida por el plano disminuye. En el sensor desarrollado, este efecto ocurre simultáneamente con el desplazamiento de la región iluminada producido por la apertura, por lo que ambos fenómenos se consideran por separado dentro del modelo. La relación entre la dirección incidente, la normal al plano fotosensible y el ángulo de incidencia se representa en la Figura 2.4.

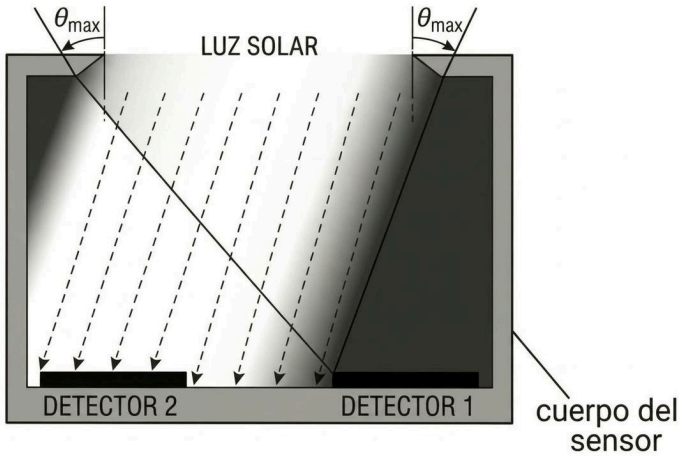



**Figura 2.4.** Incidencia de la radiación solar sobre el plano fotosensible y definición del ángulo de incidencia. Elaboración propia a partir de [22].

### 2.5.2 Conversión fotoeléctrica en el detector

Los elementos fotosensibles convierten la energía óptica incidente en una corriente eléctrica. La energía asociada con un fotón se expresa como

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda},$$

donde $h$ representa la constante de Planck, $c$ la velocidad de la luz y $\lambda$ la longitud de onda.

Cuando la energía absorbida es suficiente para generar portadores de carga en el material semiconductor, se produce una fotocorriente relacionada con la potencia óptica recibida. La respuesta del detector depende de la longitud de onda y se describe mediante la responsividad espectral $R_{\lambda}$, expresada en A/W [18].

Para representar el comportamiento del detector bajo las condiciones de iluminación consideradas se utiliza una responsividad efectiva $R_{ef}$ . Esta magnitud permite relacionar la potencia óptica recibida con la corriente generada sin desarrollar en esta etapa un análisis espectral detallado del dispositivo.

El comportamiento eléctrico del fotodiodo puede representarse mediante un modelo equivalente formado por una fuente de fotocorriente y elementos que describen las principales características no ideales del dispositivo. Entre ellos se encuentran la corriente oscura, la resistencia de derivación $R_{sh}$ y la capacitancia de unión $C_j$ . La fuente de fotocorriente representa la componente asociada con la radiación incidente, mientras que la corriente oscura corresponde a una contribución presente aun en ausencia de iluminación. La resistencia $R_{sh}$ representa las trayectorias internas de fuga y $C_j$ se relaciona con el comportamiento dinámico de la unión. Estas características dependen del dispositivo y pueden variar con la temperatura [6], [18].

En el desarrollo posterior no se requiere resolver de forma completa el circuito equivalente para cada condición de operación. Su inclusión permite identificar los principales efectos físicos que pueden modificar la respuesta del detector y mantener diferenciada la fotocorriente asociada con la radiación de las contribuciones adicionales consideradas posteriormente durante la caracterización.

### 2.5.3 Potencia óptica y fotocorriente

La potencia óptica recibida por cada elemento depende de la irradiancia efectiva y del área iluminada correspondiente [9]. Para un elemento i, esta relación se expresa como:

$$P_i = E_\theta A_i \tag{2.2}$$

donde $P_i$ representa la potencia óptica recibida, $E_\theta$ la irradiancia efectiva sobre el plano y $A_i$ el área iluminada del detector.

A partir de esta potencia, la fotocorriente generada se representa mediante la responsividad efectiva del detector [18]:

$$I_i = R_{ef} P_i \tag{2.3}$$

De esta forma, la respuesta de cada elemento depende de manera conjunta de la irradiancia incidente y de la fracción de área expuesta a la proyección de la apertura.

### 2.5.4 Respuesta eléctrica del canal

La fotocorriente generada debe convertirse en una señal compatible con el sistema de adquisición. De manera general, la respuesta de cada canal se representa como:

$$D_i = k_i I_i + b_i \tag{2.4}$$

donde $D_i$ corresponde a la señal obtenida en el canal $i$, $k_i$ representa el factor de conversión asociado con la etapa de acondicionamiento y $b_i$ agrupa las contribuciones aditivas presentes en la medición.

Las unidades de $k_i$ y $b_i$ dependen de la magnitud utilizada para representar $D_i$. Esta formulación permite mantener una descripción general antes de establecer la electrónica de adquisición empleada en el prototipo.

Con estas relaciones se establece la secuencia física básica del proceso de detección:

$$\left(E_\theta, A_i\right) \rightarrow P_i \rightarrow I_i \rightarrow D_i$$

Esta secuencia relaciona la radiación incidente con las señales que posteriormente se utilizan para estimar la dirección solar.

## 2.6 Principio de medición del sensor seleccionado

La configuración seleccionada transforma una variación en la dirección de incidencia solar en un cambio de la distribución de iluminación sobre los elementos fotosensibles. Cuando la radiación incide aproximadamente en la dirección normal al plano fotosensible, la proyección de la apertura se mantiene centrada respecto al arreglo y las áreas iluminadas de los elementos opuestos presentan valores semejantes. Al modificarse la dirección solar, esta distribución se desplaza y produce diferencias entre las señales obtenidas en cada eje.

Para la componente asociada con el eje $x_S$, la respuesta se obtiene a partir del par formado por los elementos R y L. De manera equivalente, los elementos U y D se utilizan para describir la variación correspondiente al eje $y_S$. Esta disposición permite relacionar los cambios en la dirección incidente con diferencias entre señales opuestas, manteniendo una estructura de medición equivalente para ambos ejes.

Los desplazamientos de la región iluminada sobre el plano fotosensible se representan mediante Δx y Δy. La distribución de iluminación para incidencia normal, variación principalmente sobre $x_S$, variación sobre $y_S$ e incidencia combinada se representa en la Figura 2.5.

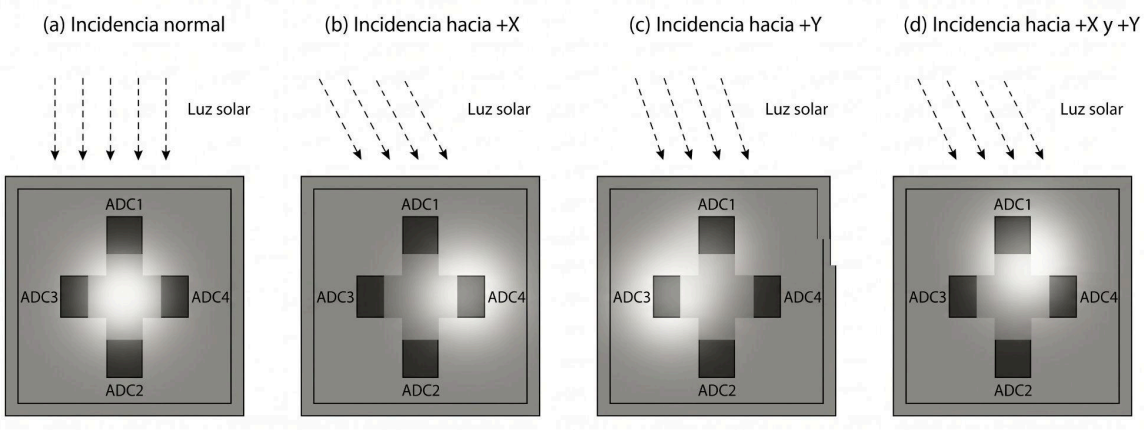



**Figura 2.5.** Formación del patrón de iluminación sobre el arreglo fotosensible para diferentes condiciones de incidencia solar a) incidencia normal; b) incidencia hacia +X; c) incidencia hacia +Y; d) incidencia hacia +X y +Y. Elaboración propia.

### 2.6.1 Acondicionamiento y adquisición de las señales

Las señales correspondientes a los cuatro elementos fotosensibles se acondicionan y adquieren mediante canales independientes, obteniéndose $D_R$, $D_L$, $D_U$ y $D_D$ . Debido a que la estimación angular se basa en la comparación entre elementos opuestos, las diferencias de ganancia, nivel de desplazamiento, ruido o saturación pueden modificar la relación entre las señales. Las características específicas de la electrónica utilizada se establecen posteriormente durante el diseño del hardware.

### 2.6.2 Procesamiento diferencial normalizado

El uso de una diferencia entre dos señales permite identificar hacia qué lado se desplaza la región iluminada, pero su magnitud también puede verse afectada por cambios comunes en el nivel de iluminación. Para reducir esta dependencia se utilizan relaciones diferenciales normalizadas entre los elementos opuestos de cada eje.

Para el eje $x_S$ , el índice normalizado se define como:

$$S_x = \frac{D_R - D_L}{D_R + D_L}. \tag{2.5}$$

De manera equivalente, para el eje $y_S$ se utiliza

$$S_y = \frac{D_U - D_D}{D_U + D_D}. \tag{2.6}$$

Estas relaciones producen variables adimensionales que describen el desbalance relativo entre los elementos de cada par. Cuando las señales opuestas presentan valores semejantes, el índice correspondiente tiende a cero. Conforme aumenta la diferencia entre ambas respuestas, el valor del índice cambia de acuerdo con el sentido y la magnitud del desplazamiento de la región iluminada.

Las relaciones requieren que la suma de las señales correspondientes mantenga un nivel suficiente para realizar la normalización. La definición de un umbral mínimo de señal depende de las características de la electrónica y de las condiciones experimentales, por lo que se establece posteriormente durante la implementación y caracterización del prototipo.

La normalización reduce el efecto de factores multiplicativos que afectan de manera semejante las señales de un mismo par. Sin embargo, no elimina las diferencias propias de los detectores ni de los canales electrónicos, por lo que estos efectos deben identificarse posteriormente durante la caracterización y calibración.

### 2.6.3 Relación entre los índices normalizados y los ángulos

Los índices $S_x$ y $S_y$ no representan directamente un ángulo. Su valor depende de la geometría del sensor, del desplazamiento de la región iluminada y de la respuesta de los elementos fotosensibles. Por esta razón, es necesario establecer una relación entre cada índice normalizado y las componentes angulares de la dirección incidente.
De manera general, esta relación se expresa como:

$$S_x = f_x(\theta_x, \theta_y), \qquad S_y = f_y(\theta_x, \theta_y).$$

La dependencia conjunta se conserva porque una incidencia combinada puede modificar simultáneamente la distribución de iluminación sobre los dos pares de elementos. No se supone en esta etapa que las relaciones sean lineales o completamente independientes. Su comportamiento se obtiene posteriormente mediante el modelo paramétrico y se contrasta con los resultados experimentales durante la calibración.

### 2.6.4 Obtención de componentes angulares

A partir de la relación entre los índices normalizados y la dirección incidente se estiman las componentes $\hat{\theta}_x$ y $\hat{\theta}_y$ . El símbolo de estimación permite distinguir los valores obtenidos mediante el sensor de los ángulos físicos o de referencia utilizados durante el modelado y la validación experimental.

Una vez determinadas ambas componentes, la dirección solar puede representarse mediante el vector unitario $S_S$ definido en la Sección 2.1. Esta representación completa el procesamiento correspondiente al sensor, mientras que su utilización dentro de un sistema de determinación de orientación depende de la arquitectura del vehículo y queda fuera del alcance del desarrollo presentado.

El principio de medición puede resumirse mediante la siguiente secuencia:

$$\theta_x, \theta_y \rightarrow \Delta x, \Delta y \rightarrow A_i \rightarrow P_i \rightarrow I_i \rightarrow D_i \rightarrow S_x, S_y \rightarrow \hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y \rightarrow S_S .$$

Esta secuencia relaciona la dirección incidente con la respuesta geométrica, fotoeléctrica y eléctrica del instrumento, así como con las variables utilizadas para representar finalmente la dirección solar.

## 2.7 Condiciones de operación y fuentes de desviación

El comportamiento del sensor puede diferir de la respuesta prevista por el modelo ideal debido a variaciones asociadas con los elementos fotosensibles, la electrónica, la geometría del conjunto y las condiciones de operación. Estas diferencias no modifican el principio de medición, pero sí pueden introducir desviaciones entre la dirección solar real y la estimada. Por esta razón, se identifican los principales efectos que deben considerarse durante el modelado, la calibración y la validación del prototipo.

### 2.7.1 Diferencias entre elementos fotosensibles

El procesamiento diferencial supone que los elementos de cada par presentan respuestas comparables bajo condiciones semejantes de iluminación. En la práctica pueden existir diferencias de responsividad, corriente oscura y comportamiento térmico entre dispositivos, por lo que las señales obtenidas no son necesariamente iguales aun cuando la distribución de iluminación sea simétrica [18].

Estas diferencias pueden producir un desplazamiento en los índices Sx y Sy y modificar la estimación del cero angular. Su efecto se identifica durante la caracterización del prototipo y se considera mediante el procedimiento de calibración, con la finalidad de reducir los desbalances entre canales.

### 2.7.2 Diferencias entre canales electrónicos

La respuesta final también depende del acondicionamiento asociado con cada detector. Variaciones en los factores $k_i$ y en los términos aditivos $b_i$ pueden modificar la relación entre las señales de un mismo par. De igual forma, el ruido eléctrico limita la capacidad para distinguir pequeñas variaciones producidas por cambios en la dirección incidente [21].

La saturación constituye otra condición relevante. Cuando alguno de los canales alcanza el límite de operación de la electrónica, la señal deja de representar adecuadamente la variación de la fotocorriente y se altera la relación utilizada durante la normalización. Por esta razón, el diseño de la etapa de acondicionamiento debe mantener las señales dentro del intervalo útil de adquisición.

### 2.7.3 Desviaciones geométricas

El principio de medición depende de la posición relativa entre la máscara y el arreglo fotosensible. Una desviación lateral de la apertura respecto al centro nominal del sensor puede desplazar la condición correspondiente a incidencia normal, mientras que una variación en la separación entre ambos planos modifica la relación entre el ángulo de incidencia y el desplazamiento de la región iluminada.

Las desviaciones laterales de la apertura respecto al centro nominal del arreglo se representan mediante $\delta x_0$ y $\delta y_0$ y se incorporan posteriormente al modelo paramétrico. La falta de paralelismo entre la máscara y el plano fotosensible también constituye una posible fuente de desviación; sin embargo, no se introduce como un parámetro independiente dentro del modelo desarrollado en este trabajo.

### 2.7.4 Condiciones de iluminación

La respuesta del instrumento puede modificarse cuando la iluminación difiere de las condiciones consideradas en el modelo ideal. Las reflexiones sobre superficies cercanas, el sombreado parcial de la apertura o una distribución espacial no uniforme pueden afectar de manera diferente las señales de los elementos fotosensibles y alterar los índices normalizados [2], [3].

La normalización reduce el efecto de variaciones que actúan aproximadamente como un factor común sobre las señales de un mismo par. Sin embargo, no elimina perturbaciones que modifican de manera diferente la iluminación de cada detector. Por esta razón, las condiciones utilizadas durante la validación experimental deben controlarse durante las pruebas para mantener una condición de iluminación reproducible.

### 2.7.5 Temperatura y condiciones ambientales

La temperatura modifica la respuesta de los elementos fotosensibles y de la electrónica de acondicionamiento. Entre los parámetros que pueden presentar dependencia térmica se encuentran la responsividad, la corriente oscura y los términos que describen la conversión de cada canal [18].

Para representar este comportamiento se considera la temperatura T como una condición de operación capaz de modificar los parámetros del sistema. De manera general,

$$R_{ef} = R_{ef}(T)$$

por lo que la fotocorriente puede expresarse como

$$I_i(T) = R_{ef}(T)P_i$$

y la señal adquirida mediante

$$D_i(T) = k_i(T)I_i(T) + b_i(T)$$

El término $I_i(T)$ conserva su definición como fotocorriente generada por la radiación. Los efectos térmicos que producen contribuciones adicionales en la señal adquirida, incluida la influencia de la corriente oscura, pueden representarse mediante los parámetros asociados con el término aditivo $b_i(T)$.

La dependencia específica utilizada posteriormente se establece a partir de la información disponible para los componentes seleccionados. La inclusión de $T$ permite analizar su posible influencia sobre la respuesta prevista, aunque la validación experimental desarrollada en este trabajo no contempla una campaña de ensayos térmicos controlados.

Para una implementación destinada a operación orbital también deben considerarse condiciones asociadas con vacío, radiación, ciclos térmicos, contaminación y degradación de materiales [2]. Estos efectos pueden modificar las propiedades de los elementos fotosensibles, la electrónica y las superficies utilizadas en el instrumento. Debido a que el prototipo se valida bajo condiciones de laboratorio, dichas condiciones no forman parte de la campaña experimental presentada y se mantienen únicamente como consideraciones para una evolución posterior del instrumento.

### 2.7.6 Implicaciones para la evaluación del sensor

Las fuentes de desviación identificadas pueden manifestarse como sesgos sistemáticos, diferencias entre canales o variaciones de la respuesta. Las diferencias de responsividad, ganancia y nivel de desplazamiento se consideran principalmente durante la caracterización y calibración del prototipo, mientras que la temperatura y la desalineación lateral se incorporan de manera explícita al modelo para analizar su influencia sobre la respuesta esperada.

Esta separación permite mantener el modelo centrado en las variables que afectan directamente la relación geométrica y física del sensor, mientras que los desbalances propios de la implementación real se determinan mediante la medición experimental.

## 2.8 Referencias tecnológicas y criterios de evaluación

Los desarrollos revisados en el Capítulo I se retoman en esta sección únicamente como referencias para contextualizar el desempeño y las condiciones de integración del prototipo. Sus prestaciones no se adoptan como especificaciones obligatorias, ya que corresponden a instrumentos con arquitecturas, procedimientos de calibración y condiciones de prueba diferentes.

Entre las referencias consideradas se encuentran el nanoSSOC-A60 de Solar MEMS Technologies [12] y los desarrollos PSS y DSS presentados por Anger et al. [11]. Los valores de campo de visión, exactitud, precisión, masa, dimensiones y consumo reportados para estos instrumentos permiten establecer un contexto tecnológico para la evaluación posterior, sin implicar que el prototipo desarrollado deba reproducir directamente dichas prestaciones. Los términos **exactitud** y **precisión** se conservan de acuerdo con la terminología empleada por cada fuente y no se consideran directamente equivalentes entre trabajos.

### 2.8.1 Campo de visión

El intervalo geométrico ideal del modelo puede describir la restricción angular predicha exclusivamente por el modelo matemático. Este límite se calcula a partir de las dimensiones físicas de la apertura, la distancia al plano focal y la geometría del arreglo, asumiendo condiciones óptimas como rayos perfectamente paralelos.

Por otro lado, el intervalo de respuesta observado experimentalmente corresponde a la respuesta real del prototipo caracterizada en el laboratorio. Este intervalo es determinado por el comportamiento físico de las señales y depende de factores no modelados, tales como la distribución real de la iluminación y los efectos de penumbra. En consecuencia, el límite geométrico predicho por el modelo y la respuesta determinada en la caracterización del prototipo no son métricas necesariamente equivalentes; el modelo establece una restricción teórica de diseño, mientras que el experimento identifica el intervalo angular operativo real del instrumento.

### 2.8.2 Error angular

La comparación entre el ángulo estimado y una referencia angular experimental se realiza mediante:

$$e_{\theta,k} = \hat{\theta}_k - \theta_{ref,k}, \qquad k \in \{x, y\}, \tag{2.7}$$

donde $\hat{\theta}_k$ representa el ángulo obtenido mediante el sensor y $\theta_{ref,\,k}$ corresponde al valor utilizado como referencia durante la prueba.

Esta definición permite evaluar de manera independiente el comportamiento de ambos ejes y proporciona una métrica directamente asociada con el procedimiento experimental utilizado en este trabajo.

### 2.8.3 Resolución angular

La resolución angular Δθ corresponde al menor cambio de la dirección incidente que puede distinguirse mediante el sistema de medición. Su valor depende de la variación producida en las señales, de la sensibilidad del instrumento, del ruido y de las características de la adquisición.

Por esta razón, la resolución no se considera únicamente como una consecuencia de la geometría ni como equivalente al incremento utilizado por el mecanismo de prueba o a un paso del convertidor analógico-digital. Su determinación se realiza a partir del comportamiento del sistema implementado.

### 2.8.4 Sensibilidad

La sensibilidad angular describe la variación de la respuesta normalizada ante un cambio de la dirección incidente. Debido a que la respuesta general del sensor puede depender simultáneamente de $\theta_x$ y $\theta_y$ , la sensibilidad de cada eje se evalúa respecto a su componente angular correspondiente, manteniendo controlada la condición del otro eje.
Para el eje $x_S$ ,

$$K_x = \frac{dS_x}{d\theta_x} \tag{2.8a}$$

mientras que para el eje $y_S$ ,

$$K_y = \frac{dS_y}{d\theta_y} \tag{2.8b}$$

Durante una caracterización individual de los ejes, estas relaciones pueden evaluarse manteniendo la otra componente angular en una condición de referencia. Como se indica en estas expresiones matemáticas, la sensibilidad puede variar con el ángulo de incidencia. Por lo tanto, no se asume constante de forma predeterminada ni se asocia automáticamente a un límite geométrico ideal, sino que su comportamiento y variación se analizan analíticamente mediante el modelo paramétrico y se evalúan empíricamente con mediciones experimentales.

Además de las prestaciones asociadas con la medición angular, se consideran parámetros de integración como la masa, las dimensiones y el consumo de potencia. Estos valores permiten comparar los recursos requeridos por el instrumento con las restricciones de la plataforma, pero se mantienen como referencias tecnológicas y no como especificaciones directas del prototipo ni como evidencia de calificación para operación espacial. Los parámetros utilizados posteriormente para evaluar el desempeño y la integración del sensor se resumen en la Tabla 2.2.

| Grupo | Parámetro | Símbolo | Criterio de evaluación |
|---|---|---|---|
| Desempeño | Intervalo angular experimental | $\Delta\theta_{exp}$ | Intervalo angular en el que se obtiene una medición válida |
| Desempeño | Error angular | $e_{\theta,k}$ | Diferencia entre el ángulo estimado y el valor de referencia |
| Desempeño | Resolución angular | $\Delta\theta$ | Menor variación angular distinguible por el sistema |
| Desempeño | Sensibilidad | $K_{\theta_x}, K_{\theta_y}$ | Variación de los índices normalizados respecto a la componente angular correspondiente |
| Integración | Masa | $m$ | Masa del instrumento |
| Integración | Dimensiones | — | Envolvente física del prototipo |
| Integración | Consumo de potencia | $P_{el}$ | Potencia eléctrica requerida durante la operación |

**Tabla 2.2.** Parámetros considerados para evaluar el desempeño y la integración del sensor.

## 2.9 Síntesis para el modelado

La arquitectura seleccionada establece una relación entre la dirección de incidencia solar, el desplazamiento de la región iluminada, el área activa de los elementos fotosensibles y las señales obtenidas en cada canal. Estas relaciones permiten definir los parámetros y variables que se incorporan al modelo paramétrico desarrollado en el capítulo siguiente.

La geometría nominal del instrumento se describe mediante las dimensiones activas de los elementos fotosensibles $w_d$ y $l_d$, las separaciones internas $g_x$ y $g_y$, las dimensiones de la apertura $w_a$ y $l_a$, y la distancia $h$ entre la máscara y el plano fotosensible. Estos parámetros determinan la forma en que una variación de $\theta_x$ o $\theta_y$ modifica la posición de la proyección sobre el arreglo.

El desplazamiento de la región iluminada se representa mediante Δx y Δy. A partir de esta posición se determina el área iluminada $A_i$ de cada detector, que junto con la irradiancia efectiva define la potencia óptica $P_i$. La respuesta fotoeléctrica y la etapa de acondicionamiento permiten obtener posteriormente la fotocorriente $I_i$ y la señal $D_i$ correspondiente a cada canal.

Las señales $D_R$, $D_L$, $D_U$ y $D_D$ se utilizan para calcular los índices diferenciales normalizados $S_x$ y $S_y$. Estos índices relacionan la respuesta del instrumento con las componentes angulares de la dirección incidente y permiten obtener posteriormente las estimaciones $\hat{\theta}_x$ y $\hat{\theta}_y$, así como la representación de la dirección mediante $S_S$.

Además de la geometría nominal, se consideran dos condiciones capaces de modificar de manera directa la respuesta prevista por el modelo. La primera corresponde a la temperatura $T$, que puede alterar parámetros del detector y de los canales electrónicos. La segunda corresponde a una desalineación lateral de la apertura respecto al arreglo fotosensible, representada mediante $\delta x_0$ y $\delta y_0$. La Tabla 2.3 resume los principales parámetros y variables que se retoman durante el desarrollo del modelo.

| Grupo | Parámetro o variable | Descripción |
|---|---|---|
| Geometría nominal | $w_d$, $l_d$ | Dimensiones activas de los elementos fotosensibles |
| Geometría nominal | $g_x$, $g_y$ | Separaciones internas entre elementos |
| Geometría nominal | $w_a$, $l_a$ | Dimensiones de la apertura |
| Geometría nominal | $h$ | Distancia entre la apertura y el plano fotosensible |
| Incidencia | $\theta_x$, $\theta_y$ | Componentes angulares de la dirección solar |
| Radiometría | $E_\theta$ | Irradiancia efectiva sobre el plano fotosensible |
| Desalineación | $\delta x_0$, $\delta y_0$ | Desplazamiento de la apertura respecto al centro nominal del arreglo |

| Grupo | Parámetro o variable | Descripción |
|---|---|---|
| Condición térmica | $T$ | Temperatura considerada en los parámetros dependientes de operación |
| Proyección | $\Delta x,\ \Delta y$ | Desplazamiento de la región iluminada |
| Detección | $A_i$ | Área iluminada de cada elemento |
| Detección | $P_i$ | Potencia óptica recibida |
| Detección | $I_i$ | Fotocorriente generada |
| Detección | $R_{ef}(T)$ | Responsividad efectiva bajo la condición térmica considerada |
| Electrónica | $D_i$ | Señal adquirida en cada canal |
| Electrónica | $k_i(T),\ b_i(T)$ | Parámetros generales de conversión y contribución aditiva del canal |
| Procesamiento | $S_x,\ S_y$ | Índices diferenciales normalizados |
| Salida | $\hat{\theta}_x,\ \hat{\theta}_y$ | Componentes angulares estimadas |
| Salida | $S_S$ | Dirección solar expresada en el sistema de referencia del sensor |
| Predicción geométrica | Intervalo geométrico ideal | Límite angular predicho matemáticamente por el modelo |
| Desempeño previsto | $K_{\theta_x}, K_{\theta_y}$ | Sensibilidad angular |

**Tabla 2.3.** Parámetros y variables considerados para el modelado del sensor.

Las diferencias individuales de responsividad, ganancia, nivel de desplazamiento y otros desbalances propios de la implementación no se incorporan como variables independientes del modelo general. Estos efectos se determinan durante la caracterización del prototipo y se consideran mediante el procedimiento de calibración. De manera equivalente, la falta de paralelismo entre la máscara y el plano fotosensible se reconoce como una posible fuente de desviación, pero no se parametriza de forma independiente en el modelo desarrollado.

El modelo matemático se utiliza en diferentes etapas del desarrollo para predecir la respuesta del sensor conforme se incorporan las características de los componentes seleccionados. En una primera etapa se analiza la configuración geométrica ideal y posteriormente se actualizan los parámetros con las dimensiones y propiedades de los elementos reales. A partir de estas evaluaciones se establecen las condiciones de diseño que conducen a la configuración implementada.

La temperatura y la desalineación lateral permiten extender el análisis respecto a la geometría nominal sin convertir el modelo en una representación detallada de todas las tolerancias de fabricación. A partir de la formulación geométrica prevista en el Capítulo III se establecen los límites teóricos ideales y la sensibilidad analítica. Además, la respuesta real del prototipo (la cual define el intervalo angular experimental válido), el error direccional y la resolución, no se asumen de manera teórica, sino que se determinan mediante la caracterización física del sistema implementado.

Capítulo

# III

# Modelado paramétrico del sensor de Sol analógico

En este capítulo se desarrolla el modelo paramétrico del sensor de Sol analógico con la finalidad de relacionar la dirección de incidencia solar con la respuesta obtenida por el arreglo fotosensible. El desarrollo parte de la geometría definida para el instrumento y considera sucesivamente el desplazamiento de la proyección de la apertura, el área iluminada de cada elemento, la conversión de la potencia óptica en fotocorriente y la generación de las señales empleadas para calcular los índices diferenciales normalizados. A partir de estas relaciones se establece posteriormente la estimación de las componentes angulares y la reconstrucción de la dirección solar en el sistema de referencia del sensor.

La formulación se mantiene independiente de las dimensiones finales del prototipo. Las variables geométricas se consideran parámetros de entrada, de manera que el modelo permite analizar el intervalo geométrico ideal, la sensibilidad y el comportamiento esperado de la respuesta para diferentes configuraciones. Los valores correspondientes al instrumento construido se incorporan posteriormente, una vez definida y verificada su geometría efectiva. Esta separación permite utilizar el mismo modelo durante el desarrollo del diseño sin establecer un procedimiento de optimización formal.

## 3.1 Definición geométrica del modelo

El modelo se formula a partir de una representación paramétrica del arreglo fotosensible, la máscara y su apertura. En esta etapa no se asignan dimensiones particulares al prototipo, sino que se establecen las variables necesarias para describir la posición relativa de los elementos y determinar posteriormente el desplazamiento de la proyección sobre el plano fotosensible.

La formulación parte de una geometría nominal en la que los elementos se encuentran alineados y los planos de la apertura y del arreglo son paralelos. Además de este caso ideal, se consideran desplazamientos laterales de la apertura respecto al centro del arreglo mediante los parámetros $\delta x_0$ y $\delta y_0$ . Otras desviaciones de fabricación y ensamblaje se consideran posteriormente mediante la caracterización y la actualización de los parámetros del modelo.

### 3.1.1 Sistema de referencia y dirección solar

Para describir la geometría del instrumento se utiliza el sistema de referencia local $F_S = \{O_S, x_S, y_S, z_S\}$ definido en el Capítulo II. El origen $O_S$ se localiza en el centro geométrico nominal del arreglo fotosensible. Los ejes $x_S$ y $y_S$ se encuentran contenidos en el plano de los fotodiodos, mientras que $z_S$ corresponde a la normal al plano fotosensible y apunta hacia el exterior del instrumento [3], [4].

La identificación de los elementos se mantiene durante todo el desarrollo. El fotodiodo derecho se denomina R, el izquierdo L, el superior U y el inferior D. De esta forma, R y L constituyen el par asociado con el eje $x_S$, mientras que U y D forman el par correspondiente al eje $y_S$.

La dirección hacia el Sol se representa mediante el vector unitario SS expresado en el marco del sensor:

$$S_S = \begin{bmatrix} s_x & s_y & s_z \end{bmatrix}, \qquad \| S_S \| = 1 \tag{3.1}$$

La orientación de la dirección solar se describe mediante dos ángulos proyectados. El ángulo $\theta_x$ corresponde a la inclinación observada sobre el plano $x_S - z_S$, mientras que $\theta_y$ corresponde a la inclinación sobre el plano $y_S - z_S$. Para el campo frontal del sensor, donde $s_z > 0$, se definen como:

$$tan\theta_x = \frac{s_x}{s_z}, \qquad tan\theta_y = \frac{s_y}{s_z}. \tag{3.2}$$

Cuando la dirección solar coincide con la normal del sensor, $\theta_x = \theta_y = 0$ y $S_S = [0\ 0\ 1]^T$. Los símbolos $\theta_x$ y $\theta_y$ se reservan para los ángulos físicos utilizados como entrada del modelo, mientras que $\hat{\theta}_x$ y $\hat{\theta}_y$ identifican los valores estimados a partir de las señales del instrumento. La Figura 3.1 presenta el sistema de referencia local y la definición de las dos componentes angulares utilizadas en el modelo.

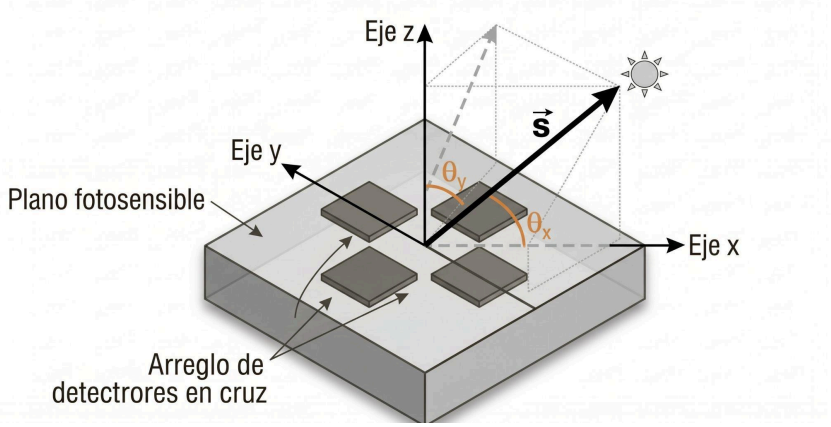



**Figura 3.1**. Sistema de referencia local del sensor, dirección solar y definición de las componentes angulares $\theta_x$ y $\theta_y$. Elaboración propia a partir de [3], [4].

### 3.1.2 Geometría del arreglo y de la apertura

La configuración analizada está formada por cuatro fotodiodos coplanares distribuidos alrededor del origen $O_S$ y una máscara opaca con apertura situada a una distancia h respecto al plano fotosensible. La radiación que atraviesa la apertura genera sobre dicho plano una región iluminada cuya posición varía en función de $\theta_x$ y $\theta_y$.

En la formulación nominal general, las áreas activas de los cuatro elementos se representan mediante regiones rectangulares equivalentes y alineadas con los ejes $x_S$ y $y_S$. Sus dimensiones se describen mediante $w_d$ y $l_d$, mientras que $g_x$ y $g_y$ representan las separaciones internas entre los elementos opuestos sobre cada eje. Aunque el desarrollo matemático permite esta evaluación rectangular, se debe indicar que, en la particularización del modelo para el diseño final implementado, se adopta un caso geométrico simétrico donde $w_d = l_d$, estableciendo así una región fotosensible cuadrada equivalente. La apertura se considera rectangular, con dimensiones paramétricas $w_a$ y $l_a$.

El plano fotosensible se toma como $z_S = 0$ y el plano nominal de la apertura se localiza en $z_S = h$. Para el caso ideal, el centro de la apertura coincide con el origen del arreglo cuando $\theta_x = \theta_y = 0$. Con la finalidad de representar una desviación lateral global entre la apertura y el arreglo se incorporan los parámetros $\delta x_0$ y $\delta y_0$. Cuando ambos términos son iguales a cero se recupera la configuración geométrica ideal.

La incorporación de estos parámetros no pretende representar todas las tolerancias mecánicas del instrumento. Las diferencias individuales de posición o dimensión de los elementos y una posible falta de paralelismo entre planos se consideran mediante la geometría efectiva y la caracterización del prototipo cuando resulten relevantes. La Figura 3.2 muestra los parámetros geométricos utilizados para representar el arreglo fotosensible y la apertura.

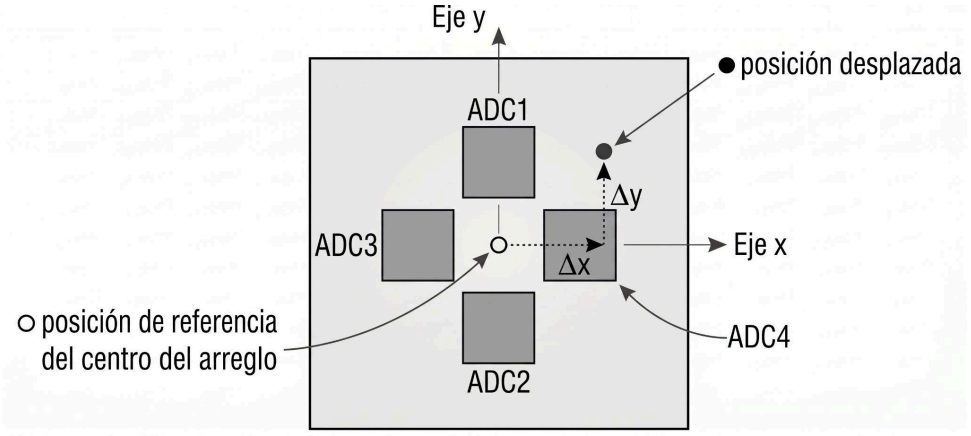



**Figura 3.2.** Definición paramétrica del arreglo fotosensible, la apertura y los desplazamientos laterales considerados en el modelo. Elaboración propia.

### 3.1.3 Variables y supuestos del modelo

Las variables utilizadas en el desarrollo se resumen en la Tabla 3.1. Se distinguen los parámetros geométricos, las condiciones físicas de operación, las variables intermedias y las magnitudes de salida con la finalidad de conservar la relación entre la geometría del instrumento y la estimación final de la dirección solar.

| Símbolo | Descripción | Tipo | Unidad |
|---|---|---|---|
| $w_d, l_d$ | Dimensiones activas de los elementos fotosensibles | Geométrica | mm |
| $g_x, g_y$ | Separación interna entre elementos opuestos | Geométrica | mm |
| $w_a, l_a$ | Dimensiones de la apertura | Geométrica | mm |
| $h$ | Distancia entre la apertura y el plano fotosensible | Geométrica | mm |
| $\delta x_0, \delta y_0$ | Desplazamiento lateral de la apertura respecto al arreglo | Geométrica | mm |
| $\theta_x, \theta_y$ | Componentes angulares de la dirección solar | Entrada angular | ° o rad |
| $\Delta x, \Delta y$ | Desplazamiento producido por la incidencia angular | Intermedia | mm |
| $x_c, y_c$ | Posición efectiva del centro de la proyección | Intermedia | mm |
| $A_i$ | Área iluminada del elemento $i$ | Intermedia | m²* |
| $E_\odot$ | Irradiancia solar de referencia sobre un plano normal a la propagación | Física | W/m² |
| $E_\theta$ | Irradiancia efectiva sobre el plano fotosensible | Física | W/m² |
| $T$ | Temperatura asociada con la condición de operación | Física | °C o K |
| $R_{eff}$ | Responsividad efectiva para la condición considerada | Fotoeléctrica | A/W |
| $P_i$ | Potencia óptica recibida por el elemento $i$ | Intermedia | W |
| $I_i$ | Fotocorriente del canal $i$ | Intermedia | A |
| $k_i$ | Factor multiplicativo del canal $i$ | Electrónica | según variable adquirida |
| $b_i$ | Contribución aditiva del canal $i$ | Electrónica | V o cuentas |
| $D_i$ | Señal adquirida correspondiente al canal $i$ | Medición | V o cuentas |
| $S_x, S_y$ | Índices diferenciales normalizados | Procesamiento | — |
| $\hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y$ | Componentes angulares estimadas | Salida | ° o rad |
| $S_S$ | Vector solar unitario en el marco del sensor | Salida | — |

**Tabla 3.1.** Variables y parámetros utilizados en el modelo paramétrico.

*Las coordenadas y áreas pueden calcularse en milímetros durante el análisis geométrico. Para utilizar el área en las relaciones de potencia óptica, las unidades deben convertirse de manera consistente con la irradiancia.

El modelo se desarrolla bajo un conjunto de hipótesis que restringen su aplicación a una representación estrictamente ideal. La radiación solar se asume como una dirección única conformada por rayos perfectamente paralelos dentro de las dimensiones del instrumento. Al tratarse de una idealización, debe quedar claro que esta formulación matemática no modela la extensión angular aparente del disco solar, la formación de penumbra, las reflexiones internas ni todas las no idealidades experimentales que afectan la respuesta del prototipo físico.

Los planos correspondientes a la máscara y al arreglo fotosensible se consideran paralelos y separados por la distancia $h$. La apertura y las áreas activas se representan mediante contornos geométricos definidos e ideales, mientras que la irradiancia se considera espacialmente uniforme sobre la región ocupada por el arreglo para una dirección de incidencia determinada.

El análisis emplea óptica geométrica y no incorpora de forma explícita la difracción producida en los bordes de la apertura. Bajo estas condiciones teóricas, la proyección conserva las dimensiones exactas de la apertura y su modificación principal sobre el plano fotosensible corresponde a una traslación pura determinada por la dirección de incidencia.

Los parámetros $\delta x_0$ y $\delta y_0$ permiten incorporar un desplazamiento lateral global respecto a la condición nominal. Las diferencias individuales entre elementos, los desbalances electrónicos y las anomalías ópticas no contenidas en esta abstracción (como las reflexiones o la penumbra previamente mencionadas) se cuantifican y compensan posteriormente mediante la calibración y la comparación entre el modelo ideal y el prototipo físico.

La temperatura $T$ se incorpora como una condición de operación que puede modificar $R_{ef}$, $k_i$ y $b_i$. En esta etapa no se establece una función térmica particular, ya que su dependencia debe definirse a partir de información disponible del componente o de la caracterización experimental correspondiente.

## 3.2 Modelo de proyección e iluminación

La máscara con apertura transforma la dirección de incidencia solar en un desplazamiento de la región iluminada sobre el plano fotosensible. Debido a que el modelo considera rayos aproximadamente paralelos y dos planos paralelos separados por una distancia $h$, la posición de la proyección se determina mediante relaciones geométricas sobre los ejes $x_S$ y $y_S$.

A partir de esta posición se calcula el traslape entre la proyección de la apertura y el área activa de cada fotodiodo. De esta manera, la dirección solar queda relacionada con las áreas iluminadas $A_R$, $A_L$, $A_U$ y $A_D$ , que posteriormente se utilizan para determinar la potencia óptica y la respuesta de cada canal.

### 3.2.1 Desplazamiento de la proyección

El vector $S_S$ se define apuntando desde el sensor hacia el Sol, mientras que la radiación se propaga en sentido contrario. Debido a esta convención, una componente angular positiva produce un desplazamiento de la proyección hacia el sentido negativo del eje correspondiente. Para dos planos paralelos separados por la distancia h, el desplazamiento producido por la dirección de incidencia se expresa como

$$\Delta x = -\, h tan\theta_x, \qquad \Delta y = -\, h tan\theta_y. \tag{3.3}$$

La geometría nominal considera que el centro de la apertura coincide con el origen del arreglo para incidencia normal. Al incorporar los desplazamientos laterales definidos en la Sección 3.1, la posición efectiva del centro de la proyección queda dada por $x_c = \delta x_0 + \Delta x$ y $y_c = \delta y_0 + \Delta y$. Cuando $\delta x_0 = \delta y_0 = 0$ se recupera el caso ideal.

Para ángulos próximos a la normal puede utilizarse $tan\theta \approx \theta$, con $\theta$ expresado en radianes, de manera que localmente $\Delta x \approx -\, h\theta_x$ y $\Delta y \approx -\, h\theta_y$ . Esta aproximación permite anticipar una región de comportamiento aproximadamente lineal, aunque no se supone válida para todo el campo de visión.La Figura 3.3 representa el desplazamiento de la proyección para una dirección de incidencia oblicua y la convención de signos adoptada.

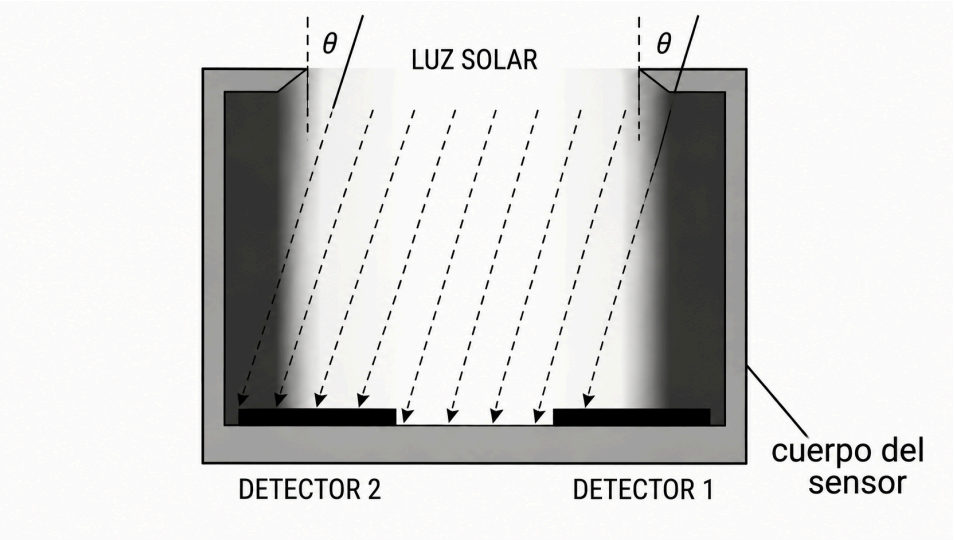



Figura 3.3. Desplazamiento de la proyección de la apertura sobre el plano fotosensible para una incidencia oblicua. Elaboración propia a partir de [3] y [22].

### 3.2.2 Área iluminada de los fotodiodos

La proyección de la apertura sobre el plano fotosensible se representa mediante la región $W'(\theta_x, \theta_y)$. Bajo las hipótesis establecidas, la proyección conserva las dimensiones $w_a$ y $l_a$ de la apertura y modifica únicamente la posición de su centro. Para una apertura rectangular,

$$x_{W,min} = x_c - \frac{w_a}{2}, \qquad x_{W,max} = x_c + \frac{w_a}{2}. \tag{3.4a}$$

$$y_{W,min} = y_c - \frac{l_a}{2}, \qquad y_{W,max} = y_c + \frac{l_a}{2}. \tag{3.4b}$$

Con estos límites, $W'$ queda definida como la región rectangular comprendida entre ambos intervalos.
Cada fotodiodo se representa mediante una región rectangular fija. Denotando sus límites por $x_{i1}$, $x_{i2}$, $y_{i1}$ y $y_{i2}$ , se escribe

$$C_i = \lfloor x_{i1}, x_{i2} \rfloor \times \lfloor y_{i1}, y_{i2} \rfloor. \tag{3.5}$$

Los límites de cada región se determinan a partir de las dimensiones activas y de la posición relativa del elemento. El área iluminada del fotodiodo $i$ se define mediante la intersección entre su área activa y la proyección de la apertura:

$$A_i = Area\left(C_i \cap W'\right). \tag{3.6}$$

Debido a que ambos contornos se representan mediante rectángulos alineados con los ejes $x_S$ y $y_S$, la intersección puede calcularse a partir del traslape independiente sobre cada coordenada. Para dos intervalos $A = \lfloor a_1, a_2 \rfloor$ y $B = \lfloor b_1, b_2 \rfloor$, se toman $c_1 = max\left(a_1, b_1\right)$ y $c_2 = min\left(a_2, b_2\right)$. La longitud de traslape se define como

$$l(A,B) = max\left(0, c_2 - c_1\right). \tag{3.7}$$

Si $X_i$, $Y_i$, $X_W$ y $Y_W$ representan los intervalos correspondientes sobre cada eje, entonces

$$L_{x,i} = l\left(X_i, X_W\right), \qquad L_{y,i} = l\left(Y_i, Y_W\right). \tag{3.8}$$

El área iluminada se obtiene entonces mediante

$$A_i = L_{x,i} L_{y,i}. \tag{3.9}$$

Por definición, $0 \le A_i \le A_d$, donde $A_d = w_d l_d$ corresponde al área activa total considerada para cada fotodiodo. Cuando la proyección cubre completamente al elemento, $A_i = A_d$; cuando existe traslape parcial, $0 < A_i < A_d$; y cuando ambas regiones dejan de intersectarse, $A_i = 0$. La Figura 3.4 muestra la intersección geométrica utilizada para calcular el área iluminada de cada elemento.

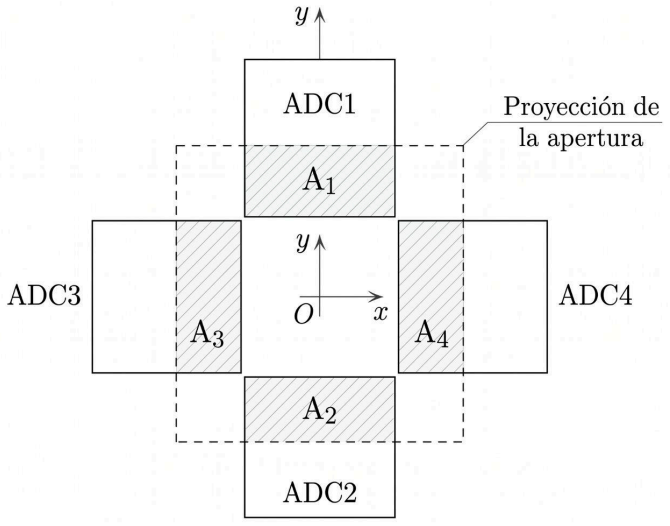



**Figura 3.4.** Intersección entre la proyección de la apertura y las áreas activas de los cuatro fotodiodos. Elaboración propia.

Las Ecs. (3.3) a (3.9) establecen la relación entre la dirección de incidencia, la geometría del instrumento y el área iluminada de cada elemento. Hasta este punto, el desarrollo es exclusivamente geométrico y no depende de la responsividad de los fotodiodos ni de la electrónica de acondicionamiento.

## 3.3 Modelo de respuesta del instrumento

El modelo geométrico permite determinar el área iluminada de cada elemento para una dirección solar determinada. A partir de estas áreas se establece la relación con la potencia óptica incidente, la fotocorriente generada y la señal obtenida por cada canal.

Esta parte del modelo mantiene una representación general del proceso de detección y adquisición. Por esta razón, no se consideran todavía la topología del circuito de acondicionamiento, los componentes electrónicos seleccionados ni las características particulares del convertidor analógico-digital. Estos elementos se incorporan posteriormente durante el diseño del instrumento.

### 3.3.1 Potencia óptica y fotocorriente

Sea $\alpha$ el ángulo espacial entre la normal $+z_S$ y la dirección solar. A partir de las definiciones de $\theta_x$ y $\theta_y$ puede escribirse

$$cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{1+tan^2\theta_x+tan^2\theta_y}}. \tag{3.10}$$

De acuerdo con la definición establecida en el Capítulo II, si $E_{\odot}$ representa la irradiancia solar de referencia sobre un plano normal a la dirección de propagación, la irradiancia efectiva sobre el plano fotosensible se expresa como

$$E_{\theta} = E_{\odot} cos\,\alpha \tag{3.11}$$

La potencia óptica recibida por cada fotodiodo depende de esta irradiancia y del área iluminada calculada en la Sección 3.2:

$$P_i = E_{\theta} A_i \tag{3.12}$$

La dirección solar modifica $P_i$ mediante dos mecanismos. El primero corresponde a la proyección de la irradiancia sobre el plano fotosensible, representada por $E_{\theta}$; el segundo se relaciona con el desplazamiento de la región iluminada y la variación correspondiente de $A_i$.

La conversión de la potencia óptica en corriente se representa mediante la responsividad efectiva del elemento fotosensible:

$$I_i = R_{eff} P_i \tag{3.13}$$

La responsividad efectiva constituye una representación compacta del comportamiento espectral descrito en el Capítulo II. En una formulación espectral completa,

la fotocorriente se obtiene mediante la integración del producto entre la irradiancia espectral y la responsividad del detector; para el modelo paramétrico desarrollado en este capítulo resulta suficiente utilizar $R_{ef}$ [18]. La temperatura se conserva como condición de operación debido a que puede modificar esta magnitud, sin establecer una función térmica particular mientras no se disponga de información suficiente para definirla.

### 3.3.2 Señal eléctrica de cada canal

La fotocorriente generada por cada elemento debe transformarse en una variable que pueda ser adquirida y procesada por el instrumento. Sin fijar todavía una topología electrónica específica, la respuesta del canal i se representa mediante

$$D_i = k_i I_i + b_i \tag{3.14}$$

El término $k_i$ agrupa los factores multiplicativos que intervienen entre la fotocorriente y la señal adquirida, mientras que $b_i$ representa las contribuciones aditivas del canal. Dependiendo de la implementación, $D_i$ puede expresarse como una tensión o directamente mediante cuentas digitales. Los parámetros $k_i$ y $b_i$ pueden presentar dependencia con la temperatura, aunque dicha relación no se fija en esta etapa.

Esta representación permite separar la señal asociada con la radiación incidente de las desviaciones introducidas por los elementos fotosensibles y la electrónica. Dentro de $b_i$ pueden quedar comprendidas contribuciones relacionadas con corriente oscura, offset y nivel base, mientras que $k_i$ representa de forma general los factores de conversión y ganancia. Los efectos de ruido se consideran posteriormente durante la caracterización del instrumento [21].

Para el caso ideal se consideran canales equivalentes, una responsividad común y términos aditivos despreciables. En estas condiciones:

$$D_i = KA_i \quad , \quad K = kR_{eff}E_\theta \tag{3.15}$$

La Ec. (3.15) muestra que, bajo estas hipótesis, las diferencias entre las señales de los cuatro canales dependen directamente de la distribución de las áreas iluminadas. En el instrumento real, las diferencias de responsividad, ganancia y nivel base producen desviaciones respecto al comportamiento ideal y se consideran mediante la caracterización y calibración de los canales.

## 3.4 Modelo diferencial normalizado

Las señales $D_R$, $D_L$, $D_U$ y $D_D$ dependen de la distribución de iluminación sobre el arreglo, pero su amplitud también se encuentra relacionada con la irradiancia incidente, la responsividad de los elementos fotosensibles y los factores de conversión de cada canal. Para reducir la dependencia respecto a componentes multiplicativas comunes se utilizan relaciones diferenciales normalizadas entre los elementos situados en posiciones opuestas.

La medición correspondiente al eje $x_S$ se obtiene a partir del par R-L, mientras que el eje $y_S$ se asocia con el par U-D. Esta correspondencia se mantiene durante el resto del desarrollo para relacionar la respuesta eléctrica con las componentes angulares $\theta_x$ y $\theta_y$ .

### 3.4.1 Señales diferenciales e índices normalizados

Las diferencias absolutas entre los canales opuestos se definen como $\Delta D_x = D_R - D_L$ y $\Delta D_y = D_U - D_D$. Estas magnitudes permiten identificar la asimetría de iluminación producida por el desplazamiento de la proyección, pero conservan una dependencia directa respecto al nivel total de señal.
Para reducir esta dependencia se definen los índices diferenciales normalizados

$$S_x = \frac{D_R - D_L}{D_R + D_L}, \qquad S_y = \frac{D_U - D_D}{D_U + D_D}. \tag{3.16}$$

Siempre que las señales sean no negativas y los denominadores presenten un valor mayor que cero,$-1 \leq S_x \leq 1$ y $-1 \leq S_y \leq 1$. En una condición nominalmente simétrica se espera $S_x \approx 0$ y $S_y \approx 0$..

El signo de cada índice depende tanto de la convención utilizada para identificar los canales como del sentido definido para los ángulos. Debido a que en la Ec. (3.3) una componente angular positiva produce un desplazamiento de la proyección hacia el sentido negativo del eje correspondiente, la pendiente de $S_x(\theta_x)$ o $S_y(\theta_y)$ puede presentar signo negativo. Esta condición no modifica la información angular contenida en el índice, siempre que la convención se mantenga durante el modelado, la calibración y el procesamiento.

Cuando uno de los elementos de un par deja de recibir iluminación, el índice no se vuelve necesariamente indefinido. Por ejemplo, si $D_L = 0$ y $D_R > 0$, entonces $S_x = 1$. La indeterminación aparece únicamente cuando DR+DL=0. De manera semejante, un valor próximo a $S_x = \pm 1$ o $S_y = \pm 1$ puede corresponder a una región de saturación geométrica en la que variaciones adicionales del ángulo producen cambios reducidos o nulos en el índice.

### 3.4.2 Cancelación de factores comunes y no idealidades

En el caso ideal definido en la Sección 3.3, la sustitución de $D_i = KA_i$ en los índices normalizados permite cancelar el factor multiplicativo común. Se obtiene

$$S_x = \frac{A_R - A_L}{A_R + A_L} \qquad S_y = \frac{A_U - A_D}{A_U + A_D} \tag{3.17}$$

Bajo estas hipótesis, la respuesta normalizada depende de la distribución relativa de las áreas iluminadas y no de la escala común introducida por la irradiancia, la responsividad o la ganancia. Esta propiedad no implica que la normalización elimine perturbaciones asimétricas ni cualquier variación de iluminación.

Para el caso no ideal, las señales del par R-L pueden representarse como $D_R = k_R I_R + b_R$ y $D_L = k_L I_L + b_L$. La sustitución en la Ec. (3.16) produce

$$S_x = \frac{k_R I_R - k_L I_L + b_R - b_L}{k_R I_R + k_L I_L + b_R + b_L} \tag{3.18}$$

Cuando $k_R \neq k_L$, los factores multiplicativos no pueden extraerse como un término común. De manera semejante, los términos aditivos no se eliminan de forma general. Incluso cuando$b_R = b_L$, el término aditivo desaparece del numerador, pero permanece en el denominador. El mismo comportamiento se presenta para el par U-D. Por esta razón, el balance relativo de los canales y sus niveles base deben determinarse durante la caracterización del instrumento.

Combinando el modelo geométrico de la Sección 3.2 con la respuesta de los canales, la relación general puede expresarse como:

$$S_x = f_x\left(\theta_x, \theta_y; p\right) \tag{3.19a}$$

$$S_y = f_y\left(\theta_x, \theta_y; p\right) \tag{3.19b}$$

donde $p$ representa el conjunto de parámetros geométricos y de canal considerados en la configuración analizada. Esta forma conserva la posible dependencia bidimensional producida por el desplazamiento de la proyección. La temperatura puede modificar algunos de los parámetros contenidos en p cuando se dispone de información suficiente para establecer dicha dependencia.

El desacoplamiento entre ejes puede utilizarse como aproximación cuando la geometría y el intervalo de operación permiten considerar $S_x \approx f_x\left(\theta_x\right)$ y $S_y \approx f_y\left(\theta_y\right)$.

## 3.5 Relación señal-ángulo y reconstrucción del vector solar

Los índices normalizados $S_x$ y $S_y$ constituyen las variables intermedias utilizadas para estimar la dirección solar. El problema de medición se resuelve en sentido inverso: a partir de los valores obtenidos para estos índices se estiman las componentes angulares $\hat{\theta}_x$ y $\hat{\theta}_y$, y posteriormente se construye la representación del vector solar unitario $S_S$ en el sistema de referencia del sensor.

### 3.5.1 Relación directa e inversa

Las Ecs. (3.19a) y (3.19b) representan la relación directa entre la dirección solar y la respuesta normalizada. Para una geometría determinada, las funciones $f_x$ y $f_y$ incorporan el desplazamiento tangencial de la proyección y la variación de las áreas iluminadas. Cuando el acoplamiento entre ejes puede considerarse reducido dentro del intervalo de operación y cada función es monótona, existen relaciones inversas:

$$\hat{\theta}_x = f_x^{-1}\left(S_x\right), \qquad \hat{\theta}_y = f_y^{-1}\left(S_y\right) \tag{3.20}$$

La existencia de una función inversa requiere que valores diferentes del ángulo produzcan respuestas distinguibles. Cuando la pendiente de la función disminuye de

manera significativa o dos direcciones producen el mismo valor del índice, la estimación deja de ser unívoca dentro de esa región.

En el caso general, cuando exista un acoplamiento apreciable entre los dos ejes, la estimación puede representarse mediante funciones bidimensionales de $S_x$ y $S_y$. La forma específica de implementación no se fija en este capítulo y puede establecerse posteriormente mediante una expresión analítica, una aproximación local, un ajuste matemático o una interpolación derivada de la calibración.

### 3.5.2 Región aproximadamente lineal

Para ángulos cercanos a la normal, la aproximación $tan(\theta) \approx \theta$ reduce localmente el desplazamiento a una relación proporcional al ángulo. Si además las áreas iluminadas varían aproximadamente de manera lineal con dicho desplazamiento, los índices normalizados pueden representarse alrededor de la condición nominal mediante

$$S_x \approx S_{x,0} + K_{\theta_x}\theta_x \tag{3.21a}$$

$$S_y \approx S_{y,0} + K_{\theta_y}\theta_y \tag{3.21b}$$

En una configuración ideal y simétrica, $S_{x,0} = S_{y,0} = 0$. Los coeficientes $K_{\theta_x}$ y $K_{\theta_y}$ corresponden a las pendientes locales $\partial S_x/\partial\theta_x$ y $\partial S_y/\partial\theta_y$. Bajo esta aproximación, la estimación angular puede expresarse como

$$\hat{\theta}_x \approx \frac{S_x - S_{x,0}}{K_{\theta_x}}, \qquad \hat{\theta}_y \approx \frac{S_y - S_{y,0}}{K_{\theta_y}} \tag{3.22}$$

La región aproximadamente lineal representa sólo una parte del comportamiento del instrumento. Atendiendo a la distinción formal del instrumento, esta región no debe confundirse con el límite geométrico ideal, tampoco equivale al intervalo angular experimental válido, y no representa por sí misma una condición de exactitud. La respuesta real también depende del balance de los canales, los términos aditivos, las desviaciones geométricas y el proceso de calibración. Fuera de esta región central puede utilizarse la relación no lineal completa proporcionada por el modelo paramétrico o por una función de mapeo obtenida a partir de los datos empíricos de calibración.

### 3.5.3 Construcción del vector solar

Una vez obtenidas $\hat{\theta}_x$ y $\hat{\theta}_y$, la dirección solar se representa mediante un vector unitario expresado en el sistema de referencia del sensor. Definiendo $N = \sqrt{1 + tan^2\hat{\theta}_x + tan^2\hat{\theta}_y}$, se obtiene:

$$S_S = \frac{1}{N}\begin{bmatrix} tan\hat{\theta}_x & tan\hat{\theta}_y & 1 \end{bmatrix}^T \tag{3.23}$$

Para incidencia normal, $\hat{\theta}_x = \hat{\theta}_y = 0$ y $S_S = [0\ 0\ 1]^T$ La componente sobre $z_S$ no corresponde a una tercera medición angular independiente, sino que se obtiene a partir de las dos componentes angulares y de la condición de norma unitaria [3], [4].

La Figura 3.5 representa la construcción geométrica del vector unitario a partir de las componentes angulares estimadas.

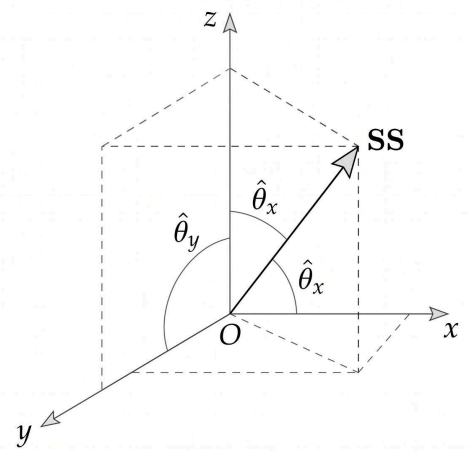



**Figura 3.5.** Construcción geométrica del vector solar unitario $S_S$ a partir de las componentes angulares $\hat{\theta}_x$ y $\hat{\theta}_y$. Elaboración propia.

El resultado representa una dirección solar en el marco local del instrumento y no constituye por sí mismo una solución completa de orientación tridimensional del nanosatélite. La transformación hacia otro sistema de referencia depende de la orientación de montaje y de la arquitectura del sistema de determinación de orientación, por lo que se mantiene fuera del modelo interno desarrollado en este capítulo.

## 3.6 Predicción del desempeño

El modelo paramétrico permite analizar el comportamiento esperado del sensor antes de incorporar las dimensiones particulares del instrumento construido. A partir de las relaciones desarrolladas se determina la forma en que la geometría modifica el intervalo geométrico útil previo al límite extremo de la respuesta normalizada, la sensibilidad y la región en la que los índices normalizados conservan información suficiente para estimar la dirección solar.

Estas magnitudes corresponden a predicciones del modelo para una configuración determinada. La resolución y el error angular del instrumento dependen además de la electrónica, el ruido, la calibración y las condiciones de la caracterización experimental, por lo que no se establecen únicamente a partir de la geometría.

### 3.6.1 Límite geométrico e intervalo geométrico útil

El desplazamiento de la proyección aumenta con el ángulo de incidencia hasta alcanzar una condición geométrica del modelo ideal en la que uno de los elementos de un par pierde completamente la iluminación. En esta condición teórica, el índice normalizado tiende a sus valores extremos algebraicos $(S \rightarrow \pm 1)$. Para el análisis numérico, en lugar de referirse a este punto como una saturación geométrica, se define un intervalo geométrico útil delimitado por un límite inferior $\theta_{geom,1}$ y un límite superior $\theta_{geom,2}$:

$$\Delta\theta_{geom} = \theta_{geom,2} - \theta_{geom,1} \tag{3.24}$$

Para una configuración geométrica ideal y simétrica, $\theta_{geom,1} = -\theta_{geom}$ y $\theta_{geom,2} = \theta_{geom}$, por lo que el intervalo total es $\Delta\theta_{geom} = 2\theta_{geom}$. El valor de este límite no constituye un parámetro independiente, sino que depende de las dimensiones y posiciones relativas de la apertura y de los elementos fotosensibles. Cuando la geometría es diferente sobre los dos ejes, o cuando existe una desalineación lateral, los límites deben determinarse de manera independiente para cada sentido y para cada eje.

La pérdida completa de iluminación ideal de uno de los elementos no implica que el índice deje de existir matemáticamente, mientras que el otro canal mantenga señal, $S_x$ o $S_y$ puede permanecer definido. El límite útil del modelo geométrico se alcanza cuando variaciones adicionales del ángulo ya no producen una modificación del índice normalizado, que permanece en su valor extremo $S = \pm 1$. La Figura 3.6 representa la transición entre la región geométrica sensible y este límite extremo de la respuesta normalizada.

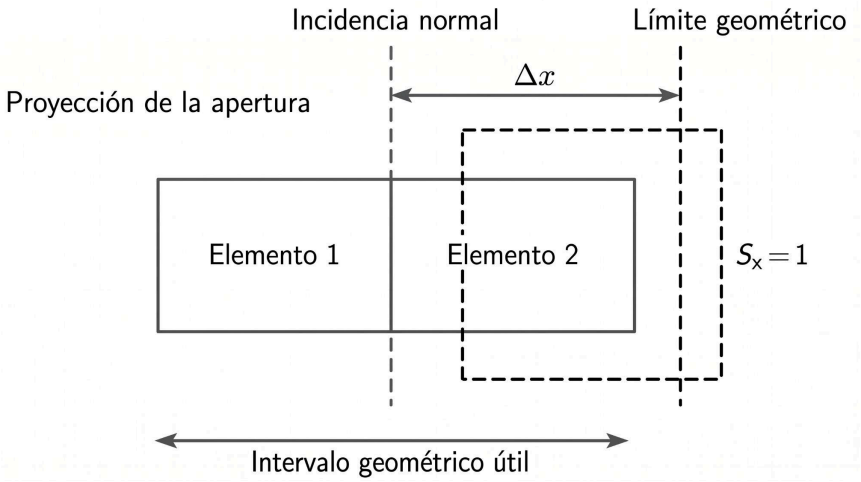



**Figura 3.6**. Límite asociado con la condición geométrica ideal de respuesta normalizada extrema $(S \to \pm 1)$ y definición del intervalo geométrico útil. Elaboración propia.

El intervalo geométrico calculado constituye estrictamente una predicción ideal y no debe identificarse automáticamente con el intervalo angular experimental del instrumento físico. Este último corresponde al rango empírico en el que la respuesta conserva sensibilidad suficiente y una relación unívoca para realizar la estimación angular, sin que se presente una verdadera saturación geométrica en los canales analógicos o en el convertidor Analógico-Digital (ADC) del hardware. Su valor final se verifica mediante la particularización del modelo y la caracterización experimental del prototipo.

### 3.6.2 Sensibilidad y relación con la resolución angular

La sensibilidad puede analizarse inicialmente mediante la relación entre el ángulo de incidencia y el desplazamiento de la proyección. A partir de la Ec. (3.3), para $j \in \{x, y\}$ la magnitud de la tasa de cambio se expresa como

$$S_{\Delta,j} = \left| \frac{\partial \Delta j}{\partial \theta_j} \right| = h sec^2 \theta_j. \tag{3.25}$$

Esta magnitud describe la conversión entre una variación angular y un desplazamiento físico sobre el plano fotosensible. Sin embargo, la variable utilizada por el procesamiento es el índice normalizado, por lo que se define también la sensibilidad de la respuesta:

$$K_{\theta_x} = \frac{\partial S_x}{\partial \theta_x}, \qquad K_{\theta_y} = \frac{\partial S_y}{\partial \theta_y}. \tag{3.26}$$

Estas derivadas incorporan la relación tangencial de la proyección y la variación de las áreas iluminadas. Su valor puede cambiar a lo largo del intervalo angular, por lo que la sensibilidad no se considera necesariamente constante.

Cuando existe un criterio conocido para establecer la variación mínima discernible de los índices, ésta puede relacionarse localmente con una variación angular mediante

$$\Delta\theta_x \approx \frac{\Delta S_{x,min}}{\left|K_{\theta_x}\right|}, \qquad \Delta\theta_y \approx \frac{\Delta S_{y,min}}{\left|K_{\theta_y}\right|}. \tag{3.27}$$

La Ec. (3.27) no constituye por sí sola una predicción de la resolución final del instrumento, ya que $\Delta S_{min}$ depende de las características de la adquisición, el ruido, la estabilidad y el procedimiento utilizado para distinguir dos condiciones angulares. Por esta razón, el modelo establece la relación entre sensibilidad y resolución, mientras que la resolución del prototipo se determina posteriormente durante la caracterización experimental.

En las regiones donde $\left|K_\theta\right|$ disminuye, una misma variación del índice representa un intervalo angular mayor. Cuando la respuesta se aproxima al límite geométrico y la pendiente tiende a cero, disminuye la capacidad para distinguir cambios adicionales de la dirección solar. Esta condición debe diferenciarse del error angular, definido en el Capítulo II mediante la comparación entre el ángulo estimado y una referencia angular experimental.

### 3.6.3 Influencia de parámetros geométricos

El carácter paramétrico del modelo permite evaluar cómo las variables geométricas modifican la respuesta antes de particularizarla para el instrumento construido. La distancia $h$ interviene directamente en el desplazamiento de la proyección. Para un mismo ángulo de incidencia, un incremento de $h$ produce un desplazamiento mayor; sin embargo, si la geometría de la base se mantiene fija, el límite angular se alcanza más rápido. De manera contraria, una menor magnitud de $h$ hace que la proyección tarde más en abandonar el área de los elementos fotosensibles, lo que aumenta el intervalo angular geométrico. Esta relación analítica es consistente con la adopción del valor final de diseño $h$, magnitud que permite extender la respuesta geométrica de las señales antes de alcanzar el límite extremo del modelo.

Las dimensiones $w_a$ y $l_a$ determinan la extensión de la región proyectada, mientras que $w_d$ y $l_d$ establecen las dimensiones activas disponibles para el traslape. De manera semejante, $g_x$ y $g_y$ modifican la posición relativa de los pares de elementos y, por tanto, las

condiciones de iluminación alrededor de la incidencia normal. Los desplazamientos $\delta x_0$ y $\delta y_0$ modifican el punto respecto al cual la distribución de iluminación resulta simétrica.

Definiendo el vector geométrico $p_g = \left(w_d, l_d, g_x, g_y, w_a, l_a, h, \delta x_0, \delta y_0\right)$, la dependencia paramétrica puede representarse de forma compacta como:

$$\{S_x, S_y, \Delta\theta_{geom}, K_\theta\} = F\left(p_g\right) \tag{3.28}$$

Ninguno de estos parámetros determina de manera aislada el comportamiento del sensor. Su efecto se obtiene al evaluar conjuntamente el desplazamiento, la intersección geométrica y los índices normalizados. Esta evaluación se utiliza para refinar la configuración teórica y no constituye un procedimiento de optimización formal. La Figura 3.7 ilustra el efecto de la distancia $h$ sobre el desplazamiento de la proyección y el intervalo geométrico útil previo al límite extremo de la respuesta ($S \to \pm 1$).

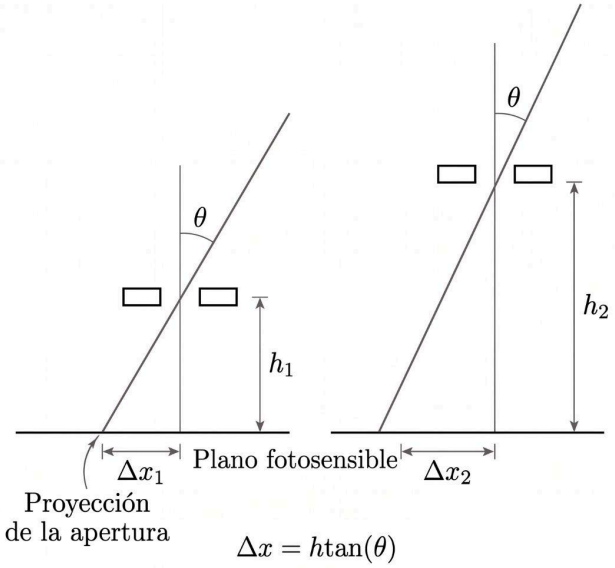



**Figura 3.7**. Influencia paramétrica de la distancia $h$ sobre el desplazamiento de la proyección y el intervalo geométrico útil. Elaboración propia.

La reducción geométrica del área iluminada también disminuye la potencia óptica y la fotocorriente disponibles. Sin embargo, la relación cuantitativa entre esta disminución de iluminación y la capacidad final para distinguir variaciones de señal depende del ruido y las características eléctricas de los amplificadores, y no se establece únicamente mediante este modelo puramente geométrico.

### 3.6.4 Implementación numérica del modelo

Las relaciones geométricas desarrolladas en las secciones anteriores se implementan en MATLAB para evaluar la respuesta normalizada del sensor para diferentes conjuntos de parámetros. La implementación utilizada en este trabajo reproduce la secuencia

$$\left(\theta_x, \theta_y\right) \to (\Delta x, \Delta y) \to \left(A_R, A_L, A_U, A_D\right) \to \left(S_x, S_y\right).$$

A partir de los índices obtenidos, el programa calcula las derivadas dSx/dθx y dSy/dθy, identifica los límites geométricos de la respuesta normalizada y determina los

límites geométricos de la respuesta normalizada, el intervalo geométrico útil y la región aproximadamente lineal alrededor de la incidencia normal. Los parámetros geométricos se introducen como datos de entrada y cada ejecución evalúa una configuración definida. La evaluación de otra configuración requiere modificar explícitamente dichos parámetros y ejecutar nuevamente el modelo.

La implementación numérica se utiliza como herramienta de evaluación sucesiva del diseño y no como un algoritmo de optimización. La formulación general admite los desplazamientos $\delta x_0$ y $\delta y_0$ mediante la posición efectiva del centro de la proyección; en el análisis paramétrico nominal se utiliza el caso centrado y estos términos se incorporan cuando se dispone de la geometría efectiva del instrumento.

Los factores fotoeléctricos y electrónicos no se incluyen de forma explícita en el cálculo geométrico normalizado utilizado por esta implementación, debido a que en el caso ideal los factores multiplicativos comunes se cancelan al formar $S_x$ y $S_y$. Su efecto se conserva en el modelo general de las secciones 3.3 y 3.4 y se evalúa posteriormente durante la caracterización de los canales.

En el Capítulo IV se incorporan a esta implementación las dimensiones correspondientes a la geometría efectiva del instrumento. A partir de esta particularización se obtiene el comportamiento esperado de la configuración construida, que posteriormente se compara con las mediciones experimentales.

## 3.7 Parámetros sujetos a determinación experimental

El modelo desarrollado representa el comportamiento del sensor a partir de una geometría conocida y de parámetros definidos para los elementos fotosensibles y los canales electrónicos. En el instrumento construido, las tolerancias dimensionales, las diferencias entre componentes y las condiciones de operación pueden producir una respuesta distinta de la obtenida mediante la configuración ideal.

No todas estas diferencias se incorporan de la misma manera. Los parámetros geométricos que intervienen directamente en el principio de medición deben verificarse sobre el prototipo y utilizarse para actualizar la geometría empleada por el modelo. Por otra parte, las diferencias de responsividad, ganancia, nivel base y la relación final entre los índices normalizados y los ángulos se determinan principalmente mediante la calibración y la caracterización experimental.

La geometría efectiva se relaciona de manera general con los valores nominales mediante
Para $q \in \{h, w_a, l_a, w_d, l_d, g_x, g_y\}$, la relación general se expresa como:

$$q_{ef} = q_{nom} + \delta q \tag{3.29}$$

En particular, los parámetros medidos o verificados directamente en el prototipo físico (como la distancia $h$, las dimensiones de la apertura y las posiciones documentadas en el CAD) se incorporan para particularizar el modelo ideal. Por su parte, las dimensiones

de la región activa $\left(w_d\,,\ I_d\right)$ corresponden a una hipótesis cuadrada equivalente derivada del área de $7.5\ mm^2$, y no a una medición directa del componente.

Después de la fabricación e integración, las dimensiones que intervienen directamente en la proyección se verifican respecto al instrumento construido. Esta información se utiliza para actualizar la representación CAD y particularizar el modelo antes de calcular el comportamiento esperado de la configuración final. Los desplazamientos laterales $\delta x_0$ y $\delta y_0$ se incorporan de la misma manera cuando pueden determinarse a partir de la geometría implementada.

Aun cuando dos fotodiodos opuestos se encuentren bajo condiciones equivalentes de iluminación, sus señales adquiridas no presentan necesariamente el mismo valor. Las diferencias pueden originarse en la responsividad de los elementos, la ganancia de los circuitos de acondicionamiento o las características de adquisición. Por esta razón, el balance relativo de los canales debe verificarse antes de atribuir una asimetría exclusivamente a la dirección de incidencia.

Los términos $b_i$ representan contribuciones que no son eliminadas de manera general mediante la normalización. Diferencias de offset, corriente oscura y nivel base pueden desplazar el valor de los índices incluso cuando la iluminación presenta una distribución geométricamente simétrica. Estos términos se determinan mediante mediciones de referencia y se compensan durante la calibración cuando resulte necesario.

La temperatura $T$ se registra como una condición auxiliar de operación debido a su posible influencia sobre la responsividad de los elementos fotosensibles y los parámetros de los canales electrónicos. En ausencia de ensayos térmicos controlados, este registro se utiliza para documentar las condiciones de medición y para identificar posibles variaciones, sin asumir una compensación térmica que no haya sido verificada experimentalmente.

Finalmente, la relación teórica entre $S_x$, $S_y$ y las componentes angulares debe contrastarse con mediciones realizadas respecto a una referencia angular experimental. Para el caso desacoplado, la relación de calibración puede expresarse de manera general como:

$$\hat{\theta}_x = F_{cal,x}\left(S_x\right), \qquad \hat{\theta}_y = F_{cal,y}\left(S_y\right). \tag{3.30}$$

La forma específica de estas funciones no se fija en esta etapa. Dependiendo de la respuesta obtenida, puede conservarse la relación proporcionada por el modelo, utilizar una aproximación local, aplicar un ajuste matemático o emplear una interpolación de los datos de calibración. El error angular se determina posteriormente mediante la definición establecida en el Capítulo II y la comparación con una referencia angular experimental. Los parámetros que requieren verificación o determinación empírica a partir del instrumento físico se resumen en la Tabla 3.2. La tabla distingue la geometría efectiva (la cual actualiza el modelo paramétrico mediante la medición física del ensamble) de los parámetros asociados exclusivamente con la calibración y la caracterización de las señales.

| Parámetro | Origen principal | Determinación | Aplicación |
|---|---|---|---|
| Geometría efectiva | Fabricación e integración | Verificación dimensional del prototipo | Particularización del modelo en el Capítulo IV |
| $\delta x_0, \delta y_0$ | Desalineación lateral entre apertura y arreglo | Verificación geométrica cuando sea posible | Actualización de la posición de la proyección |
| Balance relativo de canales | Responsividad y ganancia | Comparación entre canales bajo condiciones equivalentes | Calibración previa a la estimación angular |
| $b_i$ | Detector y electrónica | Medición del nivel base | Corrección de offset cuando resulte necesaria |
| $T$ | Condición de operación | Registro durante las mediciones | Contexto de caracterización |
| Relación $S_x - \theta_x$ | Geometría y respuesta real | Barrido angular sobre $x_S$ | Estimación de $\hat{\theta}_x$ |
| Relación $S_y - \theta_y$ | Geometría y respuesta real | Barrido angular sobre $y_S$ | Estimación de $\hat{\theta}_y$ |
| Desviación modelo-experimento | No idealidades del instrumento | Comparación de curvas calculadas y medidas | Evaluación de limitaciones |

**Tabla 3.2.** Parámetros sujetos a determinación experimental

La determinación de estos parámetros no sustituye al modelo paramétrico. Su función consiste en relacionar la formulación teórica general con el comportamiento del instrumento físico y separar las modificaciones que deben incorporarse a la geometría de aquellas que se determinan mediante la calibración y caracterización eléctrica. En particular, los valores de la geometría efectiva se incorporan para particularizar el modelo ideal en el Capítulo IV antes de generar la predicción teórica del instrumento, mientras que el balance de canales, los términos aditivos en reposo y la relación señal-ángulo empírica se extraen y verifican exclusivamente mediante las mediciones realizadas durante la caracterización.

## 3.8 Síntesis del modelo

El modelo desarrollado relaciona la dirección de incidencia solar con la respuesta obtenida por los cuatro elementos fotosensibles mediante una secuencia de transformaciones geométricas, fotoeléctricas y de procesamiento. Las componentes angulares $\theta_x$ y $\theta_y$ determinan el desplazamiento de la proyección de la apertura sobre el plano fotosensible; a partir de esta posición se calculan las áreas iluminadas $A_R$, $A_L$, $A_U$ y $A_D$.

Las áreas iluminadas, junto con la irradiancia efectiva, permiten determinar la potencia óptica recibida por cada elemento y la fotocorriente correspondiente. La respuesta de los canales se representa posteriormente mediante las señales $D_R$, $D_L$, $D_U$ y $D_D$, a partir de las cuales se construyen los índices diferenciales normalizados $S_x$ y $S_y$.

La relación completa del modelo se resume como:

$$(\theta_x, \theta_y) \rightarrow (\Delta x, \Delta y) \rightarrow A_i. \tag{3.31a}$$

$$A_i \rightarrow P_i \rightarrow I_i \rightarrow D_i. \tag{3.31b}$$

$$D_i \rightarrow (S_x, S_y) \rightarrow (\hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y) \rightarrow S_S. \tag{3.31c}$$

En la configuración ideal, los factores multiplicativos comunes a los canales de cada par se cancelan al formar los índices normalizados, por lo que la respuesta depende principalmente de la distribución relativa de las áreas iluminadas. Esta propiedad no elimina de forma general las diferencias de responsividad, ganancia, offset, temperatura o iluminación asimétrica, por lo que dichos efectos deben considerarse mediante la caracterización del instrumento.

El modelo admite además los desplazamientos laterales $\delta x_0$ y $\delta y_0$, que permiten representar diferencias globales entre la posición nominal y la posición efectiva de la apertura respecto al arreglo. De manera semejante, la temperatura $T$ se conserva como condición de operación mediante su posible influencia sobre $R_{ef}$, $k_i$ y $b_i$, sin establecer una dependencia térmica particular cuando no se dispone de información suficiente para definirla.

A partir de esta formulación se obtiene el comportamiento esperado del sensor para una geometría determinada. Las principales magnitudes derivadas del modelo corresponden a los límites geométricos de la respuesta normalizada y el intervalo geométrico útil, la sensibilidad y las curvas $S_x(\theta_x, \theta_y)$ y $S_y(\theta_x, \theta_y)$. La resolución angular final y el error respecto a una referencia angular experimental se determinan posteriormente mediante la caracterización experimental del prototipo.

La implementación numérica permite evaluar sucesivamente la respuesta conforme se incorporan las características de la configuración seleccionada. Esta evaluación se utiliza como apoyo durante el desarrollo del diseño y no como un procedimiento de optimización formal.

En el Capítulo IV se verifican las dimensiones que intervienen directamente en el principio de medición y se actualiza la representación geométrica para corresponder con la configuración implementada. Los parámetros obtenidos se incorporan al modelo desarrollado en este capítulo para generar la predicción del comportamiento esperado del instrumento. Finalmente, la comparación entre estas predicciones y la respuesta medida se realiza durante la caracterización experimental presentada en el Capítulo V.

Capítulo

# IV

## Diseño del sensor de Sol analógico

El modelo desarrollado en el Capítulo III establece la relación entre la dirección de incidencia solar, el desplazamiento de la proyección sobre el plano fotosensible, las áreas iluminadas y los índices diferenciales normalizados utilizados para estimar la dirección solar. A partir de este planteamiento, el desarrollo del instrumento requiere trasladar las variables del modelo a dimensiones, componentes electrónicos, interconexiones y operaciones de procesamiento que puedan implementarse físicamente.

En este capítulo se describe dicha transición. El desarrollo comprende la definición de los parámetros geométricos del prototipo, la selección de los elementos fotosensibles y de acondicionamiento, el diseño de la tarjeta de circuito impreso, la implementación digital del procesamiento y el desarrollo de la estructura mecánica encargada de conservar la relación espacial entre la apertura y los detectores. Finalmente, el modelo numérico implementado en MATLAB se particulariza con la geometría del diseño para establecer el comportamiento esperado del instrumento antes de la caracterización experimental.

El diseño no se formula como un problema de optimización. No se establece una función objetivo ni un algoritmo destinado a determinar una combinación óptima de dimensiones o componentes. Las decisiones se realizan de manera progresiva a partir del modelo paramétrico, las restricciones de integración, las características de los dispositivos disponibles, la manufacturabilidad y los recursos técnicos y económicos disponibles para la construcción del prototipo. El modelo se utiliza como una herramienta de evaluación del diseño y no como un procedimiento de búsqueda de un óptimo.

### 4.1 Criterios y parámetros de diseño

El modelo del Capítulo III permite relacionar las dimensiones físicas del instrumento con las variables empleadas para obtener la dirección solar. En el diseño, la distancia $h$ se materializa mediante la separación entre el plano de la apertura y el plano fotosensible; $w_a$ y $l_a$ corresponden a las dimensiones de la apertura; mientras que las posiciones y dimensiones activas de los fotodiodos quedan determinadas por su disposición sobre la PCB y por la geometría de la región fotosensible. La Tabla 4.1 resume la correspondencia entre las principales variables del modelo y los elementos físicos que las materializan en el instrumento.

| Variable o magnitud | Significado en el modelo | Implementación física |
|---|---|---|
| $h$ | Separación entre el plano de la apertura y el plano fotosensible | Estructura mecánica entre la apertura y la PCB |
| $w_a, l_a$ | Dimensiones de la apertura | Ventana de la tapa |
| $w_d, l_d$ | Dimensiones de la región fotosensible | Área activa de cada fotodiodo |
| $x_R, x_L, y_U, y_D$ | Posición de los elementos fotosensibles | Posición de los componentes sobre la PCB |
| $\delta x_0, \delta y_0$ | Desplazamiento lateral global entre apertura y arreglo | Diferencia entre la geometría nominal y la geometría efectiva, cuando se determina |
| $A_R, A_L, A_U, A_D$ | Áreas iluminadas | Intersección entre la proyección de la apertura y cada fotodiodo |
| $I_R, I_L, I_U, I_D$ | Fotocorrientes | Respuesta de los cuatro fotodiodos |
| $D_R, D_L, D_U, D_D$ | Señales adquiridas | Señales acondicionadas y digitalizadas |
| $S_x, S_y$ | Índices diferenciales normalizados | Procesamiento digital |
| $\hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y$ | Componentes angulares estimadas | Procesamiento local |
| $S_S$ | Dirección solar | Resultado entregado por el instrumento |

**Tabla 4.1.** Correspondencia entre el modelo paramétrico y el diseño físico.

La correspondencia presentada en la Tabla 4.1 mantiene la continuidad entre el modelo matemático y las decisiones adoptadas durante la implementación. En particular, la PCB y la estructura mecánica forman parte del principio de medición debido a que determinan la posición relativa entre la apertura y las regiones fotosensibles.

### 4.1.1 Selección del elemento fotosensible

La selección del elemento fotosensible considera tanto sus características fotoeléctricas como la posibilidad de integrar cuatro unidades dentro de una configuración compacta. Durante el desarrollo se consideran los dispositivos TEMD5010X01, BPW34S, PDB-C171SM y VEMD8082. La comparación no corresponde a una matriz ponderada ni a un procedimiento de optimización; documenta las alternativas consideradas y los criterios que conducen al componente empleado.
La Tabla 4.2 resume las alternativas evaluadas durante esta etapa.

| Dispositivo | Consideración principal | Resultado |
|---|---|---|
| TEMD5010X01 | Montaje superficial, bajo perfil e integración favorable en el arreglo | Seleccionado |
| BPW34S | Alternativa de silicio considerada inicialmente; configuración física menos conveniente para la tarjeta compacta | No seleccionado |
| PDB-C171SM | Características físicas compatibles con el concepto de detección | Alternativa |
| VEMD8082 | Dispositivo SMD compacto considerado durante la selección | Alternativa no seleccionada |

**Tabla 4.2.** Fotodiodos considerados durante el diseño.

El TEMD5010X01 es un fotodiodo PIN de silicio de montaje superficial y vista superior. El fabricante especifica un área fotosensible de $7.5\ mm^2$ y una respuesta espectral característica entre 430 y 1100 nm [25]. Las dimensiones exteriores del encapsulado condicionan la integración mecánica y el espacio disponible sobre la PCB, pero no se identifican directamente con wd y ld, ya que estas variables representan la región

fotosensible utilizada por el modelo. Las características del dispositivo que intervienen de manera directa en el diseño se presentan en la Tabla 4.3.

| Característica | Valor / consideración |
|---|---|
| Tecnología | Fotodiodo PIN de silicio |
| Montaje | SMD, vista superior |
| Área fotosensible | $7.5\ mm^2$ |
| Intervalo espectral | 430–1100 nm |
| Dimensiones exteriores | Se utilizan para integración mecánica y PCB, no como región activa del modelo |
| Región fotosensible | Debe representarse mediante las dimensiones activas adoptadas en el diseño |
| Temperatura de operación | -40 a 100 °C [25] |

**Tabla 4.3.** Características del TEMD5010X01 relevantes para el diseño.

La hoja de datos especifica además una corriente fotogenerada bajo condiciones determinadas de irradiancia y longitud de onda. Ese valor no se extrapola directamente a iluminación solar o de banda ancha. La corriente correspondiente a las condiciones utilizadas en la caracterización se determina experimentalmente en el Capítulo V.

### 4.1.2 Geometría nominal y geometría utilizada por el modelo

Una vez seleccionado el tipo de fotodiodo, se establece una configuración geométrica inicial para materializar el principio desarrollado en el Capítulo III. Los cuatro detectores se distribuyen nominalmente de manera simétrica respecto al origen del arreglo. Las posiciones de sus centroides se definen como:

$$R = (+\ 5.2, 0)\ mm, \qquad L = (-\ 5.2, 0)\ mm,$$
$$U = (0, +\ 5.2)\ mm, \qquad D = (0, -\ 5.2)\ mm. \tag{4.1}$$

La apertura nominal se establece como una región cuadrada de

$$w_{a,nom} = l_{a,nom} = 9.0\ mm, \tag{4.2}$$

mientras que la separación nominal entre el plano de la apertura y el plano fotosensible se define como

$$h_{nom} = 6.5\ mm. \tag{4.3}$$

La Figura 4.1 presenta la correspondencia entre esta geometría y el modelo utilizado para describir el desplazamiento de la proyección sobre el arreglo fotosensible.

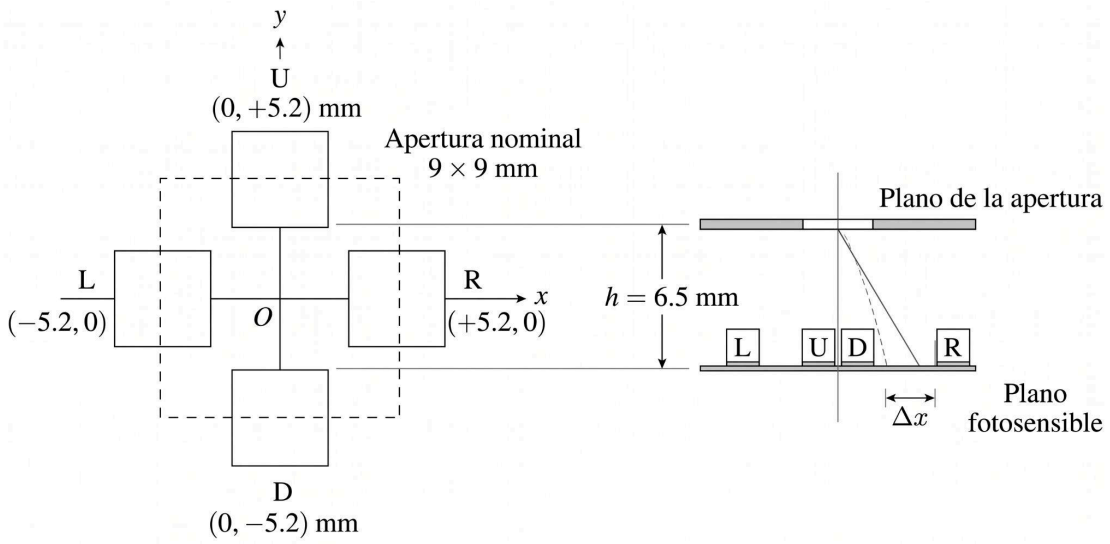



**Figura 4.1.** Correspondencia entre el modelo geométrico y la configuración física del sensor, mostrando la disposición R, L, U y D, la apertura y la separación h entre el plano de la apertura y el plano fotosensible. Elaboración propia.

Los valores anteriores representan únicamente la intención nominal de diseño. Para la evaluación final, los valores geométricos correspondientes al diseño se introducen en el programa. No se utilizan dimensiones obtenidas a partir de fotografías del prototipo ni se sustituyen las dimensiones de la región activa por las dimensiones exteriores del encapsulado plástico. La Tabla 4.4 concentra los parámetros utilizados en la evaluación final, aclarando que $w_d = l_d = 2.7386\,mm$ es una aproximación geométrica equivalente. Los valores nominales permiten documentar la configuración preliminar de partida, mientras que la última columna se completa con los parámetros definitivos antes de generar los resultados de la Sección 4.6, separando claramente aquellos verificados físicamente en el ensamble (como la separación $h$) de las abstracciones geométricas utilizadas por el modelo.

| Parámetro | Valor nominal de diseño | Valor utilizado en la evaluación final |
|---|---|---|
| $h$ | 6.5 mm | 2.4 mm |
| $w_a$ | 9.0 mm | 9.0 mm |
| $l_a$ | 9.0 mm | 9.0 mm |
| $w_d$ | - | 2.7386 mm |
| $l_d$ | - | 2.7386 mm |
| $x_R$ | +5.2 mm | +5.2 mm |
| $x_L$ | -5.2 mm | -5.2 mm |
| $y_U$ | +5.2 mm | +5.2 mm |
| $y_D$ | -5.2 mm | -5.2 mm |
| $\delta x_0$ | 0 mm | 0 mm |
| $\delta y_0$ | 0 mm | 0 mm |

**Tabla 4.4.** Parámetros geométricos utilizados para particularizar el modelo.

El fabricante Vishay proporciona el área total fotosensible del componente $A = 7.5\,mm^2$, pero no especifica las dimensiones laterales de la región activa. Por la simetría adoptada en el modelo ideal, se asume una región fotosensible cuadrada equivalente de $2.7386 \times 2.7386\,mm$ $\left(w_d = l_d\right)$. Esta abstracción geométrica permite evaluar analíticamente las intersecciones de luz sin afirmar que corresponde a la geometría física real medida en el componente. Asimismo, el valor final de $h = 2.4\,mm$ sustituye al valor preliminar y corresponde a la separación verificada y medida físicamente en el prototipo ensamblado.

La actualización de estos parámetros no constituye una búsqueda de una geometría óptima. Corresponde únicamente a la particularización del modelo con la configuración real previamente construida y medida.

## 4.2 Diseño electrónico

Una vez definidos los elementos fotosensibles y su disposición geométrica, se requiere transformar la corriente generada por cada detector en una señal compatible con la adquisición digital. Para ello se implementan cuatro canales equivalentes correspondientes a los fotodiodos R, L, U y D.

Cada canal incorpora una resistencia de sensado $R_s$, uno de los cuatro canales del INA4180A4 y una entrada del convertidor analógico-digital integrado en el MSPM0C1104. La notación $R_s$ se utiliza para distinguir esta resistencia de la resistencia equivalente en paralelo $R_{sh}$ asociada con el modelo eléctrico del fotodiodo.

La tensión generada sobre la resistencia de sensado se expresa como

$$V_{s,i} = I_i R_s. \tag{4.4}$$

Para el prototipo se utiliza

$$R_s = 5\ \Omega. \tag{4.5}$$

La señal se acondiciona mediante el INA4180A4, cuya variante A4 presenta una ganancia nominal de 200 V/V [26]. Por tanto,

$$V_{o,i} = GV_{s,i} = GR_s I_i, \tag{4.6}$$

y para los valores seleccionados se obtiene

$$V_{o,i} = 1000 I_i, \tag{4.7}$$

con $I_i$ expresada en amperios y $V_{o,i}$ en voltios. La Ec. (4.7) representa únicamente la relación eléctrica implementada entre la corriente del fotodiodo y la tensión de salida. No constituye una predicción de la corriente generada bajo una condición determinada de iluminación. Las características del amplificador utilizadas durante el diseño se resumen en la Tabla 4.5.

| Característica | Valor / consideración |
|---|---|
| Tipo | Amplificador de sensado de corriente |
| Número de canales | 4 |
| Variante | A4 |
| Ganancia nominal | 200 V/V |
| Alimentación | 2.7–5.5 V |
| Intervalo de modo común | -0.2–26 V |

| Característica | Valor / consideración |
|---|---|
| Ancho de banda de la variante A4 | 105 kHz |
| Temperatura de operación | -40 a 125 °C |
| Uso en el prototipo | Acondicionamiento de los cuatro canales fotosensibles |

**Tabla 4.5.** Características del INA4180A4 relevantes para el diseño [26].

La utilización de un solo dispositivo de cuatro canales reduce el número de circuitos integrados necesarios, aunque no se supone que los cuatro canales presenten una respuesta exactamente idéntica. Las diferencias residuales de offset y ganancia se consideran entre las no idealidades que posteriormente deben evaluarse mediante caracterización y calibración.

### 4.2.1 Adquisición analógico-digital

Las salidas $V_{o,R}$, $V_{o,L}$, $V_{o,U}$ y $V_{o,D}$ se conectan a entradas analógicas del MSPM0C1104. El microcontrolador incorpora un ADC SAR de 12 bits [27]. Para una referencia nominal de 3.3 V, el paso ideal de cuantización es

$$q = \frac{V_{ref}}{2^{12}} = \frac{3.3}{4096} \approx 0.806\ mV/cuenta. \tag{4.8}$$

Una lectura ideal puede relacionarse aproximadamente con la tensión mediante

$$N_i \approx \frac{V_{o,i}}{q}, \tag{4.9}$$

donde $N_i$ representa la cuenta digital del canal $i$. El valor de 3.3 V se utiliza para establecer la escala nominal del ADC y no como una tensión que el amplificador deba alcanzar necesariamente de manera lineal. El rango útil debe respetar simultáneamente las condiciones de operación del amplificador y del convertidor.

### 4.2.2 Sensor auxiliar de temperatura

El diseño incorpora un TMP236AQDBZRQ1 conectado a una entrada adicional del ADC. La finalidad de este dispositivo consiste en registrar una variable auxiliar de temperatura durante la operación del prototipo. La variante TMP236-Q1 presenta una salida analógica y un intervalo de alimentación compatible con la alimentación utilizada en la tarjeta [28].

En el alcance de esta tesis, la temperatura se conserva como una variable auxiliar. No se desarrolla un modelo térmico ni un algoritmo de compensación térmica de la respuesta angular. La Figura 4.2 resume la arquitectura electrónica de los cuatro canales fotosensibles y de la medición auxiliar de temperatura.

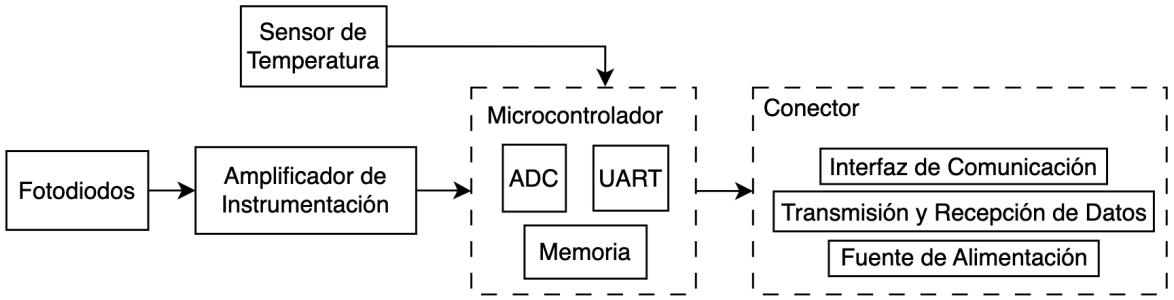



**Figura 4.2.** Diagrama de bloques de la arquitectura electrónica del sensor de Sol: fotodiodos, INA4180A4, ADC del MSPM0C1104, TMP236 y comunicación UART. Elaboración propia.

La arquitectura electrónica establece la transición entre la fotocorriente generada por los elementos y las variables disponibles para el procesamiento digital.

## 4.3 Diseño PCB

La tarjeta de circuito impreso cumple dos funciones dentro del instrumento. La primera consiste en proporcionar las interconexiones eléctricas necesarias para los cuatro canales de detección, el acondicionamiento, la adquisición y el procesamiento. La segunda corresponde a la definición física de la posición relativa de los fotodiodos, por lo que la geometría del layout forma parte del principio de medición.

De manera general, una diferencia entre la posición nominal y la posición materializada de un elemento puede representarse como

$$x_{i,real} = x_{i,nom} + \delta x_i, \qquad y_{i,real} = y_{i,nom} + \delta y_i. \tag{4.10}$$

Los términos $\delta x_i$ y $\delta y_i$ no reciben un valor numérico cuando no existe una medición que permita determinarlos. Para la evaluación final se utiliza la geometría documentada por la PCB y el CAD en lugar de introducir tolerancias supuestas.

### 4.3.1 Dimensiones y organización del layout

El desarrollo evoluciona hacia una tarjeta específica para el sensor, con dimensiones aproximadas de $20 \times 35\ mm$ y un espesor nominal de $1.6\ mm$. Estos valores corresponden a la integración del prototipo y no constituyen parámetros directos del modelo angular, salvo por su influencia sobre la posición de los componentes y la compatibilidad con la estructura mecánica.

En la cara detectora se ubican los cuatro fotodiodos TEMD5010X01 y el sensor auxiliar de temperatura TMP236. En la cara opuesta se concentran principalmente el INA4180A4, el MSPM0C1104 y los componentes asociados al acondicionamiento y procesamiento. La Figura 4.3 muestra la organización general de ambas caras de la tarjeta.

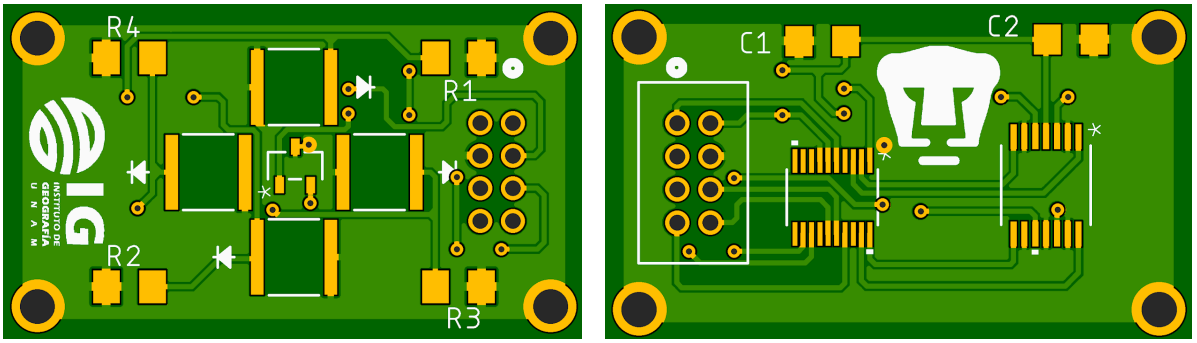



**Figura 4.3.** Vista de ambas caras de la PCB. La cara detectora contiene los fotodiodos R, L, U y D y el sensor auxiliar de temperatura; la cara opuesta concentra principalmente la electrónica de acondicionamiento, adquisición y procesamiento. Elaboración propia.

### 4.3.2 Materiales y referencias de diseño

La PCB utiliza un sustrato FR-4 de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio. No se atribuyen al material propiedades adicionales que no hayan sido confirmadas mediante la documentación específica de fabricación. El conector empleado pertenece a la familia Molex Milli-Grid de paso 2.00 mm [29]. La Tabla 4.6 resume las características constructivas utilizadas en el diseño.

| Elemento | Material / característica | Función |
|---|---|---|
| Sustrato | FR-4 | Soporte mecánico y aislamiento eléctrico |
| Espesor nominal | 1.6 mm | Soporte físico de componentes |
| Conductores | Cobre | Interconexión eléctrica |
| Componentes | SMD y THT según dispositivo | Integración de la electrónica |
| Conector | Molex 87831-0841 | Alimentación e interfaz externa |

**Tabla 4.6.** Materiales y características constructivas de la PCB.

Como marco de buenas prácticas se consideran referencias IPC aplicables a tarjetas rígidas y a la definición de patrones de montaje. Estas normas no se presentan como evidencia de certificación formal del prototipo. La Tabla 4.7 indica las referencias empleadas durante el desarrollo.

| Norma | Aplicación considerada |
|---|---|
| IPC-2221C [30] | Criterios generales de diseño de tarjetas impresas |
| IPC-2222B [31] | Diseño de tarjetas rígidas |
| IPC-7352 [32] | Definición de land patterns |
| IPC-4101E-WAM1 [33] | Referencia para materiales base de PCB rígidas y multicapa |

**Tabla 4.7.** Referencias IPC utilizadas como marco de diseño.

Durante el layout se procuran recorridos cortos y una organización semejante entre las ramas correspondientes a R, L, U y D. Esta decisión se adopta como criterio práctico de interconexión y no implica que recorridos de longitud aproximadamente igual produzcan una igualdad exacta de impedancia o eliminen por sí mismos las fuentes de ruido.

Antes de generar los archivos destinados a fabricación se utilizan las herramientas de comprobación de reglas de diseño del entorno ECAD. El flujo general comprende la elaboración del esquemático, la asignación de footprints, el layout, la verificación de reglas y la generación de archivos de fabricación.

## 4.4 Diseño digital

La etapa digital tiene la función de adquirir las señales correspondientes a los cuatro canales fotosensibles y realizar las operaciones necesarias para obtener las componentes angulares de la dirección solar. Para esta función se utiliza el MSPM0C1104, que integra el convertidor analógico-digital, los recursos de procesamiento, la memoria y la interfaz de comunicación requeridos por el prototipo [27].

La implementación digital mantiene la estructura matemática definida en el Capítulo III, pero debe distinguirse de la herramienta MATLAB utilizada para evaluar el modelo. MATLAB se emplea durante el diseño para analizar el comportamiento esperado de una geometría determinada, mientras que el MSPM0C1104 realiza el procesamiento embebido

de las señales adquiridas por el instrumento. Los recursos del microcontrolador que se relacionan con esta implementación se resumen en la Tabla 4.8.

| Característica | Valor / disponibilidad | Aplicación |
|---|---|---|
| Núcleo | ARM Cortex-M0+ | Procesamiento local |
| Frecuencia máxima | 24 MHz | Ejecución del firmware |
| Memoria Flash | 16 KB | Programa y datos almacenados |
| SRAM | 1 KB | Variables de operación |
| ADC | SAR, 12 bits | Adquisición de fotodiodos y temperatura |
| Velocidad máxima del ADC | Hasta 1.5 MSPS a 12 bits | Capacidad del periférico, no frecuencia de prueba |
| Canales ADC externos | Hasta 10, según encapsulado | Cuatro fotodiodos y temperatura |
| UART | Disponible | Comunicación del instrumento |
| SPI | Disponible | No utilizada como salida principal |
| I2C | Disponible | No utilizada como salida principal |
| Encapsulado empleado | VSSOP-20 | Integración en la PCB |

**Tabla 4.8.** Recursos del MSPM0C1104 relevantes para el instrumento [27].

La velocidad máxima indicada en la Tabla 4.8 corresponde a la capacidad del periférico y no se presenta como la frecuencia de muestreo utilizada durante la caracterización.

### 4.4.1 Adquisición y cálculo de los índices normalizados

Las lecturas digitales correspondientes a los cuatro canales se representan mediante NR, NL, NU y ND. Estas variables constituyen la representación digital de las señales acondicionadas y permiten calcular los índices normalizados mediante

$$S_x = \frac{N_R - N_L}{N_R + N_L}, \tag{4.11a}$$

$$S_y = \frac{N_U - N_D}{N_U + N_D}. \tag{4.11b}$$

El firmware verifica que los denominadores sean distintos de cero antes de realizar las divisiones. La aproximación de un índice a valores cercanos a $\pm 1$ no se interpreta por sí misma como un fallo de normalización; puede corresponder a una condición en la que uno de los elementos del par ha reducido significativamente su área iluminada.

Una vez obtenidos $S_x$ y $S_y$, las componentes angulares se estiman mediante las relaciones de calibración que se determinen experimentalmente:

$$\hat{\theta}_x = F_x(S_x), \qquad \hat{\theta}_y = F_y(S_y). \tag{4.12}$$

Los valores concretos de $F_x$ y $F_y$ no se fijan en este capítulo. El firmware se estructura para utilizar las relaciones obtenidas durante la calibración presentada en el Capítulo V. A partir de $\hat{\theta}_x$ y $\hat{\theta}_y$, el microcontrolador reconstruye la dirección solar $S_S$ mediante la relación establecida en el Capítulo III. La Figura 4.4 resume la secuencia de adquisición y procesamiento ejecutada por el firmware.

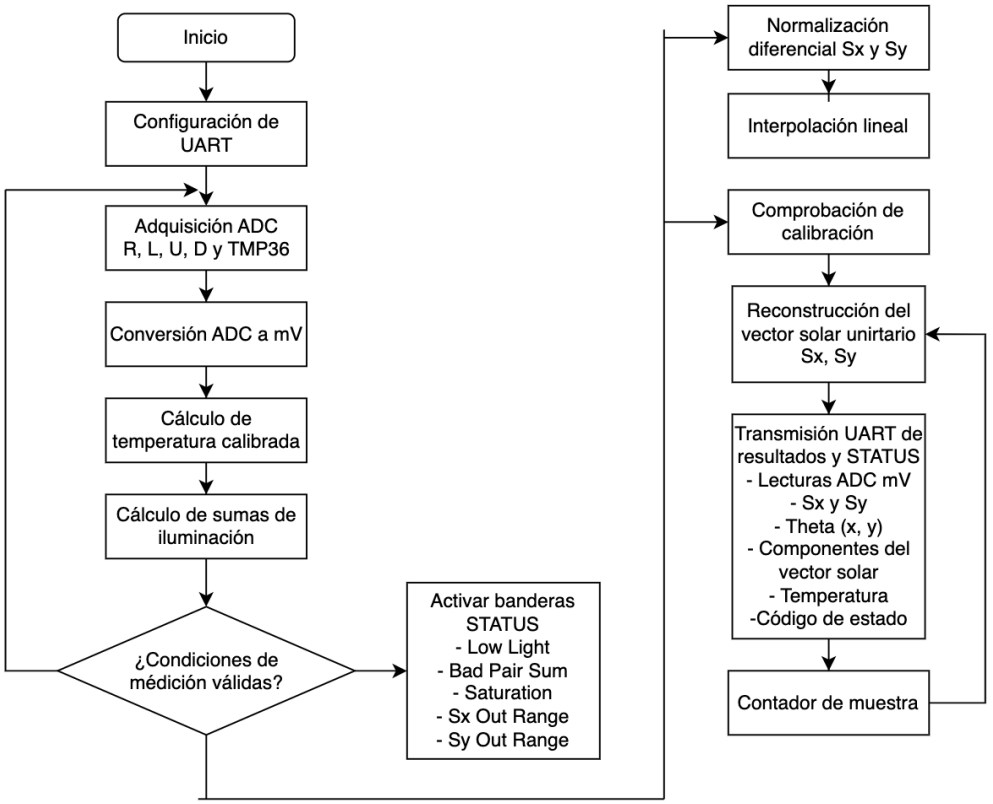



**Figura 4.4.** Diagrama de flujo del firmware del sensor de Sol: inicialización, adquisición de los canales R, L, U y D, adquisición de temperatura, cálculo de $S_x$ y $S_y$, estimación angular, reconstrucción de la dirección solar y transmisión mediante UART. Elaboración propia.

La interfaz final utiliza UART para transmitir las variables requeridas durante la operación y la caracterización. La comunicación no modifica el principio de medición; su función consiste en entregar al sistema externo la información calculada localmente y facilitar el registro de datos durante las pruebas.

## 4.5 Diseño mecánico

La estructura mecánica tiene la función de conservar la relación espacial entre la apertura y el arreglo fotosensible. Por esta razón, su geometría forma parte directamente del principio de medición y no se limita a proporcionar soporte o protección a la tarjeta electrónica.

La configuración se compone de una base que aloja la PCB y de una tapa que incorpora la apertura. La combinación de ambas piezas establece la posición relativa entre el plano fotosensible y el plano de la apertura, además de mantener la correspondencia entre el centro geométrico del arreglo y la ventana utilizada para producir el patrón de iluminación.

Para la configuración final se utiliza $h_{nom} = 2.4\ mm$ y una apertura cuadrada de $9 \times 9\ mm$. Para la evaluación final se emplea la geometría indicada en la Tabla 4.4.
La separación entre planos interviene directamente en el desplazamiento de la proyección:

$$\Delta x = -\ h tan\theta_x, \qquad \Delta y = -\ h tan\theta_y \tag{4.13}$$

En la región próxima a incidencia normal, con  expresado en radianes,

$$\frac{d\Delta}{d\theta} \approx -h \tag{4.14}$$

La Ec. (4.14) permite interpretar la función de la separación entre planos: un incremento de h produce un desplazamiento mayor para una misma variación angular. Sin embargo, esta modificación también altera el intervalo angular disponible antes de alcanzar las condiciones geométricas de saturación. Por esta razón, $h$ se considera un parámetro de diseño cuya influencia se evalúa mediante el modelo, sin formular un problema de optimización.

### 4.5.1 Apertura, base y tapa

Para una apertura rectangular, los límites de la región proyectada sobre el plano fotosensible se encuentran determinados por

$$x_c \pm \frac{w_a}{2}, \qquad y_c \pm \frac{l_a}{2} \tag{4.15}$$

La apertura no determina por sí sola el campo de visión. Su efecto depende conjuntamente de $h$, de las dimensiones y posiciones de las regiones fotosensibles y, cuando se dispone del dato, de un desplazamiento lateral entre el centro de la apertura y el centro del arreglo. La Figura 4.5 presenta el modelo CAD de la base utilizada para alojar la PCB y establecer la separación entre planos.

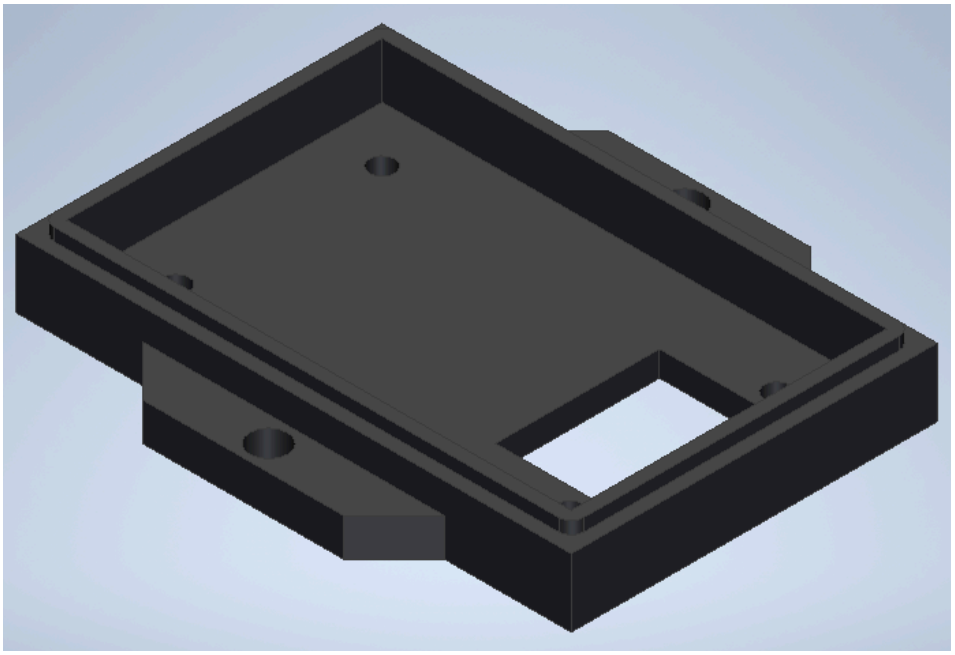


**Figura 4.5.** Modelo CAD de la base utilizada para alojar la PCB y establecer la separación entre el plano fotosensible y el plano de la apertura. Elaboración propia.

La Figura 4.6 presenta la tapa y la apertura utilizadas para definir la región proyectada sobre el arreglo.

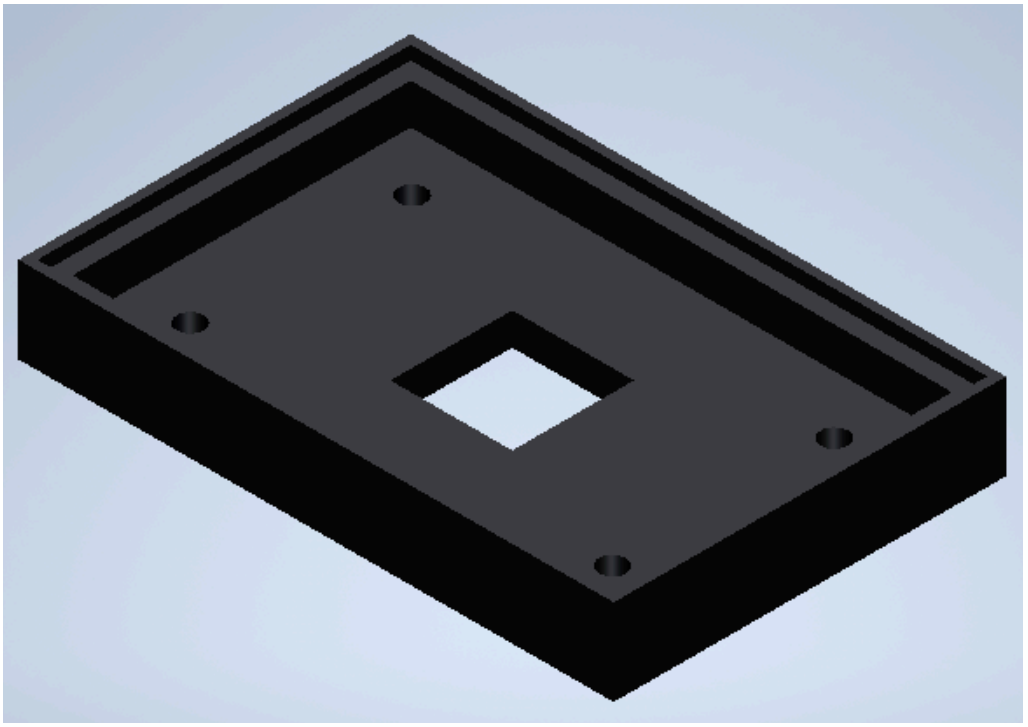


**Figura 4.6.** Modelo CAD de la tapa de la estructura mecánica con la apertura utilizada para generar el patrón de iluminación sobre el arreglo fotosensible. Elaboración propia.

### 4.5.2 Alineación e integración

Para la condición nominal, el centro de la apertura coincide con el centro geométrico del arreglo, por lo que $\delta x_0 = \delta y_0 = 0$. Cuando se dispone de una desviación lateral documentada, la posición efectiva de la proyección se expresa como

$$x_c = \delta x_0 - h tan\theta_x, \qquad y_c = \delta y_0 - h tan\theta_y \tag{4.16}$$

No se asignan valores diferentes de cero a $\delta x_0$ o $\delta y_0$ si éstos no pueden determinarse mediante el diseño o una verificación dimensional. Las posibles diferencias individuales de posición de los componentes tampoco se convierten en parámetros independientes cuando no existe una medición que permita cuantificarlas.

La base, la PCB y la tapa utilizan referencias comunes de montaje con la finalidad de conservar la correspondencia entre el centro de la apertura y el centro geométrico del arreglo. En conjunto, estos elementos materializan los parámetros $x_R$, $x_L$, $y_U$, $y_D$, $h$, $w_a$ y $l_a$ utilizados en el modelo.

### 4.5.3 Selección del material

La base y la tapa se diseñan en aluminio 6061-T6. La elección considera la función estructural requerida por el prototipo, su compatibilidad con procesos de mecanizado, la disponibilidad del material y el costo dentro de los recursos del proyecto. La documentación técnica de NASA sobre esta aleación se utiliza como referencia de propiedades y procesos [34]. La Tabla 4.9 resume los materiales considerados como referencia durante el desarrollo.

| Material | Consideración para el diseño |
|---|---|
| Al 6061-T6 | Propiedades mecánicas suficientes para el prototipo, disponibilidad y facilidad de mecanizado; seleccionado |
| Al 7075-T6 | Mayor resistencia mecánica, sin que dicha característica resulte necesaria para el alcance del prototipo |
| Acero inoxidable | Alternativa estructural con mayor densidad |
| Ti-6Al-4V | Alta resistencia específica, con mayor costo y complejidad de fabricación |

**Tabla 4.9.** Materiales considerados para la estructura mecánica.

La Tabla 4.9 proporciona contexto para la selección y no representa una evaluación ponderada ni un procedimiento de optimización de materiales. Tampoco se atribuyen al instrumento características de blindaje frente a radiación, comportamiento térmico espacial, resistencia a cargas de lanzamiento o desempeño dinámico que no hayan sido evaluadas. No se asigna una frecuencia natural a la estructura, ya que no se realizaron análisis modales ni ensayos de vibración o choque.

## 4.6 Diseño final y comportamiento esperado del instrumento

La integración de los subsistemas anteriores permite establecer una configuración en la que la geometría, la electrónica, el procesamiento digital y la estructura mecánica permanecen relacionados. La PCB fija las posiciones de los cuatro fotodiodos; la estructura mecánica establece la separación entre el plano fotosensible y la apertura; la tapa define la ventana; y la electrónica convierte la respuesta de los detectores en señales disponibles para el procesamiento. La Figura 4.7 presenta la integración CAD de la PCB, la base y la tapa. La representación empleada en esta figura debe corresponder con los valores finales consignados en la Tabla 4.4.

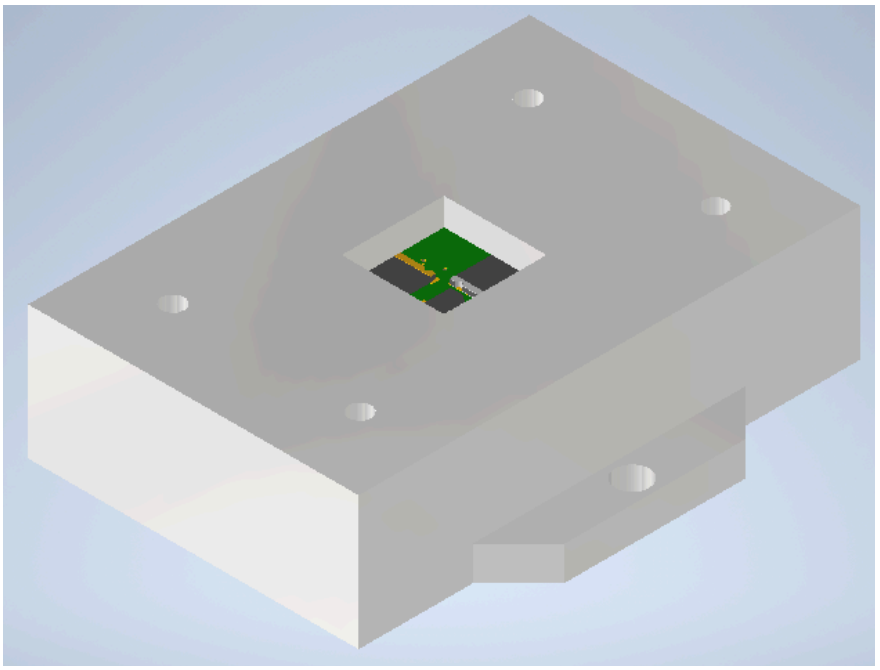


**Figura 4.7.** Integración CAD de la PCB y de la estructura mecánica del sensor de Sol, mostrando la relación entre el arreglo fotosensible, la base y la apertura. Elaboración propia.

### 4.6.1 Particularización del modelo en MATLAB

Se implementa numéricamente el modelo geométrico desarrollado en el Capítulo III. La versión utilizada para el diseño no contiene modos basados en dimensiones estimadas a partir de fotografías, no sustituye la región activa por las dimensiones exteriores del encapsulado y no realiza una búsqueda de una configuración óptima.

Los parámetros de entrada corresponden directamente con la geometría consignada en la Tabla 4.4. De manera compacta,

$$p_d = \{h, w_a, l_a, w_d, l_d, x_R, x_L, y_U, y_D, \delta x_0, \delta y_0\}. \tag{4.17}$$

Para cada barrido angular, el programa determina el desplazamiento de la proyección, calcula el área iluminada de cada fotodiodo y obtiene los índices normalizados. La secuencia numérica corresponde a

$$\left(\theta_x, \theta_y\right) \rightarrow (\Delta x, \Delta y) \rightarrow \left(x_c, y_c\right) \rightarrow \left(A_R, A_L, A_U, A_D\right) \rightarrow \left(S_x, S_y\right). \tag{4.18}$$

El programa evalúa una configuración suministrada por el usuario. No modifica automáticamente h, las dimensiones de la apertura, las posiciones de los fotodiodos ni las dimensiones activas para mejorar un indicador de desempeño. Por lo tanto, su utilización corresponde a la evaluación de una geometría de diseño y no a un procedimiento de optimización.

### 4.6.2 Respuesta y sensibilidad previstas

A partir de los barridos sobre cada eje se obtienen las relaciones

$$S_x = f_x\left(\theta_x\right), \qquad S_y = f_y\left(\theta_y\right). \tag{4.19}$$

La Figura 4.8 presenta las curvas de respuesta normalizada calculadas con la geometría final de la Tabla 4.4. Debido a la simetría adoptada en el modelo ideal mediante la región cuadrada equivalente, las curvas teóricas de ambos ejes se superponen de manera exacta a lo largo de todo el intervalo.

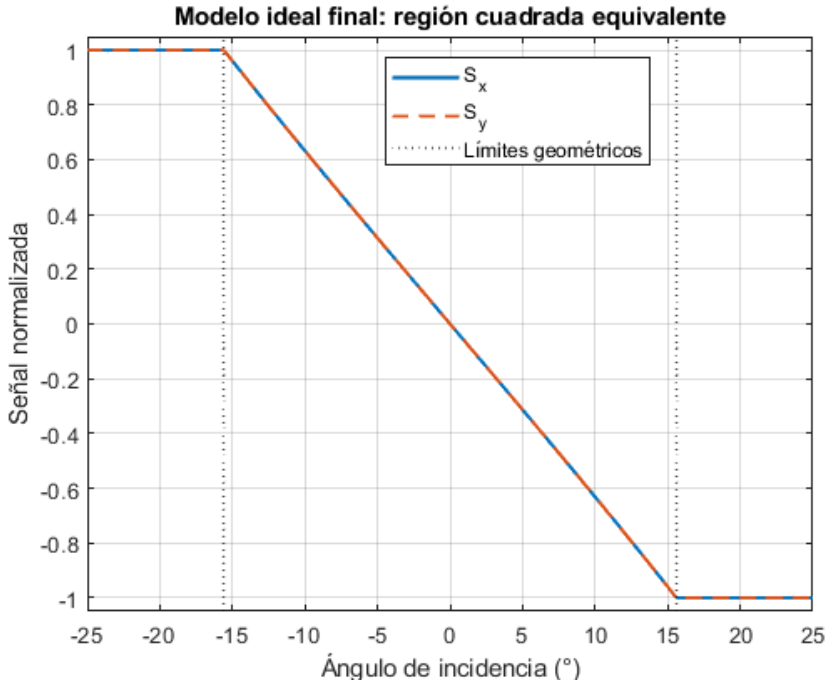



**Figura 4.8.** Respuesta angular normalizada prevista mediante MATLAB para la configuración final del instrumento: $S_x(\theta_x)$ y $S_y(\theta_y)$. Elaboración propia.

La sensibilidad local se determina mediante

$$K_{\theta_x} = \frac{\partial S_x}{\partial \theta_x}, \qquad K_{\theta_y} = \frac{\partial S_y}{\partial \theta_y}. \tag{4.20}$$

La Figura 4.9 presenta las curvas de sensibilidad obtenidas a partir de la misma configuración. De igual manera, se observa que los ejes $x_S$ y $y_S$ presentan valores idénticos de sensibilidad ideal.

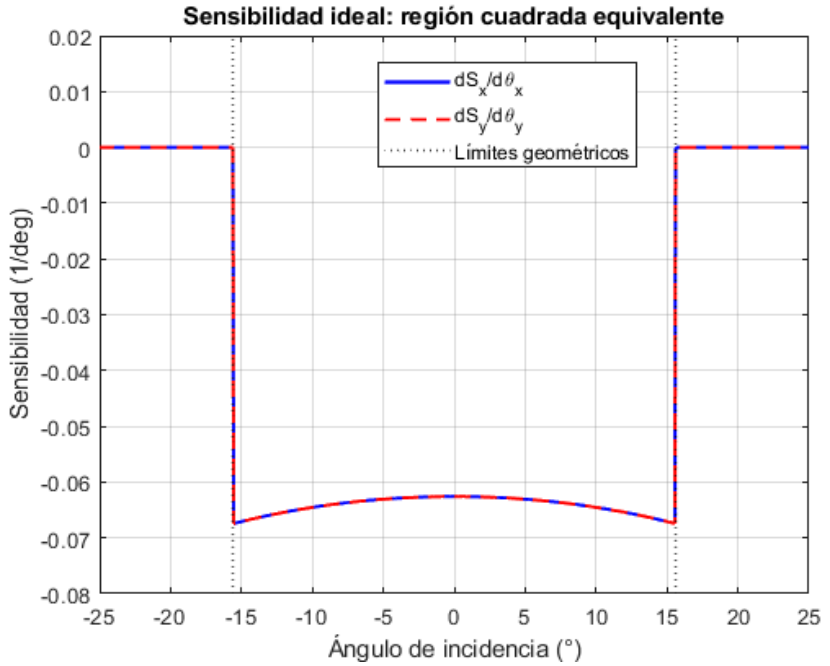



**Figura 4.9**. Sensibilidad angular prevista para los ejes $x_S$ y $y_S$, obtenida a partir de las curvas normalizadas calculadas en MATLAB. Elaboración propia.

Los límites del intervalo geométrico útil (donde $S \to \pm\ 1$) se conservan de manera independiente para los sentidos positivo y negativo de incidencia. Para el eje $x_S$, el intervalo total se define como:

$$\Delta\theta_{geom,x} = \theta_{geom,x(+)} - \theta_{geom,x(-)} \tag{4.21a}$$

mientras que para el eje $y_S$,

$$\Delta\theta_{geom,y} = \theta_{geom,y(+)} - \theta_{geom,y(-)} \tag{4.21b}$$

Esta definición paramétrica permite conservar una posible asimetría en caso de evaluar una geometría distinta. Cuando los límites positivo y negativo son perfectamente simétricos, el intervalo geométrico ideal corresponde analíticamente al doble de la magnitud de uno de ellos.

Los valores paramétricos obtenidos para la configuración geométrica ideal final se concentran en la Tabla 4.10.

| Magnitud | Eje $x_S$ | Eje $y_S$ |
|---|---|---|
| Límite geométrico negativo | -15.583º | -15.583º |
| Límite geométrico positivo | 15.583º | 15.583º |
| Intervalo geométrico útil | 31.165º totales | 31.165º totales |
| Sensibilidad en incidencia normal | -0.06258 1/° | -0.06258 1/° |

**Tabla 4.10.** Comportamiento esperado de la configuración final obtenido mediante el modelo.

### 4.6.3 Arquitectura funcional final

La secuencia completa de transformación del instrumento puede representarse como

$$\left(\theta_x, \theta_y\right) \to \left(A_i\right) \to \left(I_i\right) \to \left(V_{o,i}\right) \to \left(N_i\right) \to \left(S_x, S_y\right) \to \left(\hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y\right) \to S_S\,, \quad i \in \{R, L, U, D\}. \tag{4.22}$$

La Figura 4.10 resume esta arquitectura y muestra la correspondencia entre el dominio geométrico, la conversión fotoeléctrica, el acondicionamiento, la adquisición digital y la estimación de la dirección solar.

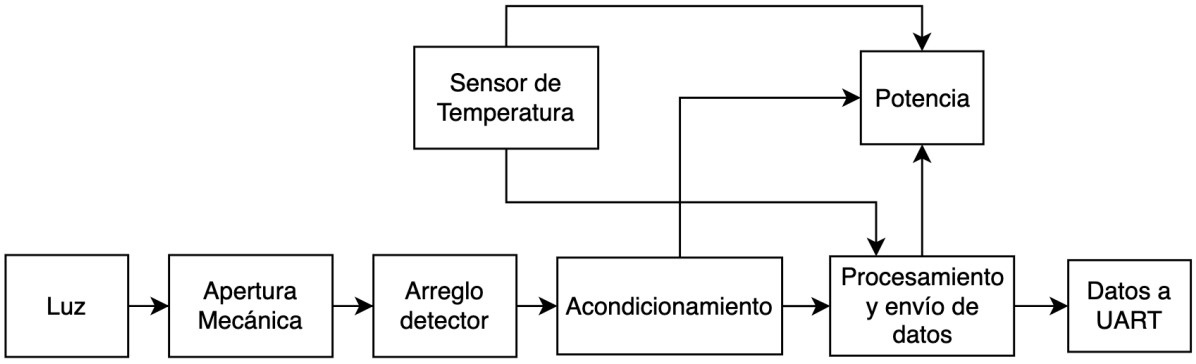



**Figura 4.10.** Arquitectura funcional final del sensor de Sol, mostrando la secuencia desde la dirección de incidencia y la iluminación del arreglo hasta la estimación de las componentes angulares y la obtención de la dirección solar. Elaboración propia.

La salida del instrumento corresponde a las componentes angulares estimadas y a la dirección solar expresada en el sistema de referencia del sensor. Esta información no constituye por sí sola una solución completa de orientación tridimensional del nanosatélite.

## 4.7 Recapitulación del capítulo

En este capítulo se realiza la transición desde el modelo paramétrico hacia el diseño físico del sensor de Sol. La configuración se desarrolla mediante evaluaciones sucesivas de las decisiones adoptadas, tomando en cuenta la geometría requerida, los componentes disponibles, las restricciones de integración y las posibilidades de fabricación.

El TEMD5010X01 se selecciona como elemento fotosensible y se integra en un arreglo de cuatro detectores. La respuesta de cada canal se acondiciona mediante una resistencia de sensado y el INA4180A4, posteriormente se digitaliza mediante el ADC integrado en el MSPM0C1104. La PCB materializa tanto las interconexiones como las posiciones relativas de los elementos fotosensibles, mientras que la estructura mecánica establece la relación entre el plano fotosensible y la apertura.

La geometría nominal proporciona los parámetros iniciales utilizados durante el desarrollo. Para la evaluación final, los valores geométricos correspondientes al diseño se introducen en la versión definitiva del programa de MATLAB. A partir de ellos se obtienen las curvas normalizadas teóricas, la sensibilidad y los límites geométricos del modelo ideal. Este procedimiento no corresponde a una optimización matemática, ya que el modelo se utiliza como una herramienta analítica para evaluar una configuración definida mediante criterios de ingeniería.

Con esta etapa se establece el comportamiento esperado del instrumento. La fabricación, la integración física, la calibración, la determinación del error angular y la comparación entre las predicciones teóricas y las respuestas experimentales corresponden al Capítulo V.

Capítulo

# V

# Implementación y validación experimental

Una vez concluido el diseño del instrumento descrito en el Capítulo IV, se procede a la fabricación, integración y caracterización experimental del prototipo. Esta etapa tiene como finalidad comprobar el funcionamiento de la secuencia completa de medición y establecer experimentalmente la relación entre las señales producidas por el arreglo fotosensible y los ángulos de incidencia.

El proceso comprende la fabricación de la tarjeta y de la estructura mecánica, el ensamble del prototipo, la verificación inicial de la adquisición electrónica, la implementación de un banco para realizar barridos angulares, la construcción de relaciones de calibración y la comparación entre los ángulos estimados por el sensor y una referencia angular experimental.

$$fabricación \rightarrow integración \rightarrow adquisición \rightarrow calibración \rightarrow caracterización \rightarrow evaluación\ angular \quad (5.1)$$

A diferencia del capítulo anterior, donde se establecen los criterios y decisiones de diseño, en este capítulo se documentan las actividades y resultados correspondientes al prototipo físico y a las pruebas realizadas en tierra.

## 5.1 Fabricación e integración del prototipo

La primera etapa consiste en materializar la arquitectura desarrollada previamente mediante la fabricación de la PCB, el montaje de los componentes electrónicos y el mecanizado de la estructura mecánica. La implementación conserva la disposición en cruz de los cuatro fotodiodos, la apertura ubicada sobre el plano fotosensible, la electrónica de acondicionamiento y adquisición y el procesamiento local mediante el MSPM0C1104.

### 5.1.1 Fabricación y ensamble de la PCB

La tarjeta se fabrica a partir del layout desarrollado en el Capítulo IV. La configuración implementada corresponde a una PCB compacta en la que se integran los cuatro fotodiodos TEMD5010X01, la etapa de acondicionamiento, el MSPM0C1104, el sensor auxiliar de temperatura y los componentes asociados. La Figura 5.1 muestra la tarjeta después del proceso de fabricación.

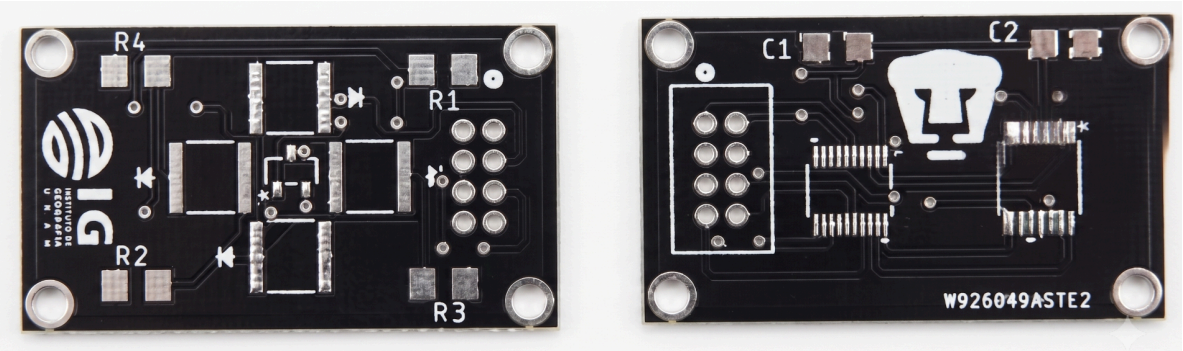



**Figura 5.1.** PCB fabricada para el prototipo del sensor de Sol.

Posteriormente se realiza el ensamble de los componentes electrónicos. La cara destinada a la captación contiene los elementos fotosensibles, mientras que la electrónica principal se concentra en la cara opuesta, de acuerdo con la distribución definida durante el diseño. La Figura 5.2 presenta la PCB después del montaje.

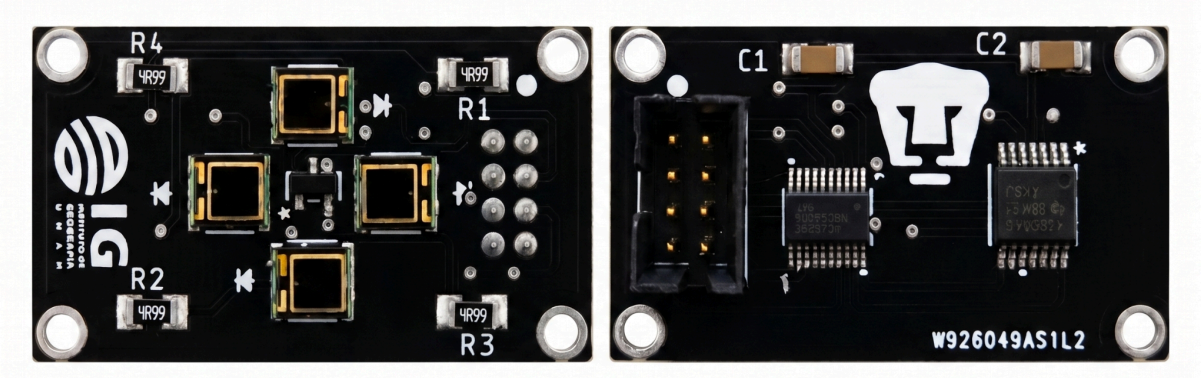



**Figura 5.2.** PCB del sensor de Sol con los componentes electrónicos ensamblados.

La disposición física de los fotodiodos es relevante tanto para la implementación electrónica como para el modelo geométrico, debido a que sus posiciones relativas determinan las áreas iluminadas utilizadas en el cálculo de las señales normalizadas.

### 5.1.2 Fabricación de la estructura mecánica

La estructura mecánica se fabrica mediante mecanizado por control numérico computarizado a partir de los modelos CAD desarrollados durante la etapa de diseño. El proceso comprende las cavidades destinadas a alojar la PCB y el conector, los barrenos de fijación y la apertura de la tapa. Durante parte del mecanizado se utiliza una fresa plana de 3 mm. La Figura 5.3 muestra una etapa del proceso de mecanizado.

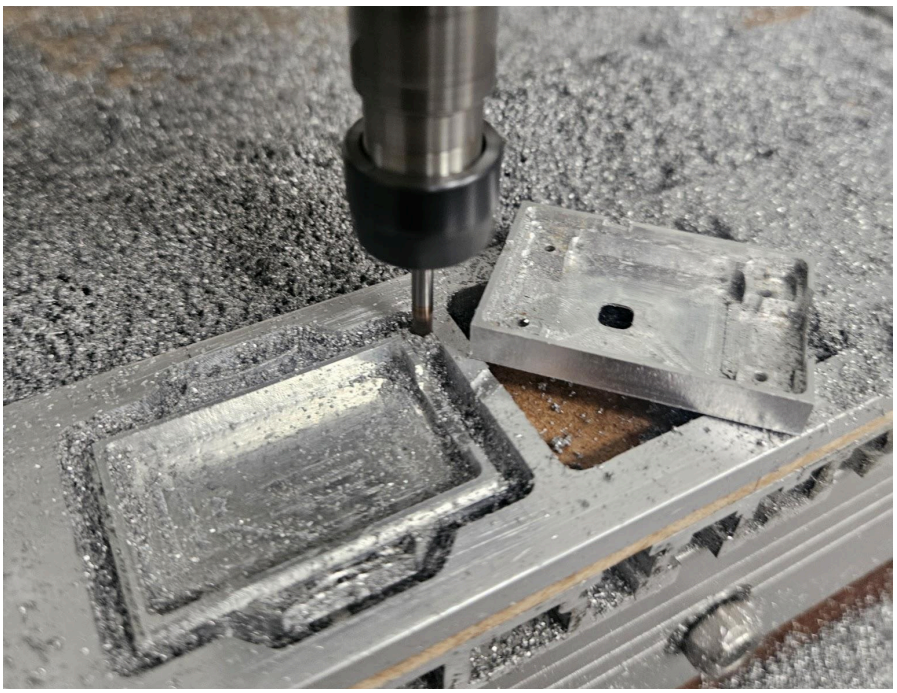


**Figura 5.3.** Proceso de mecanizado CNC de la estructura mecánica del sensor de Sol.

La apertura nominal utilizada durante el diseño se establece como una región cuadrada de 9 × 9 mm. Los elementos mecánicos se fabrican en aluminio 6061-T6 y los barrenos permiten realizar la fijación mediante tornillería M2.

$$w_{a,nom} = l_{a,nom} = 9\,mm \tag{5.2}$$

La Figura 5.4 presenta los elementos mecánicos después del mecanizado y del acabado superficial.

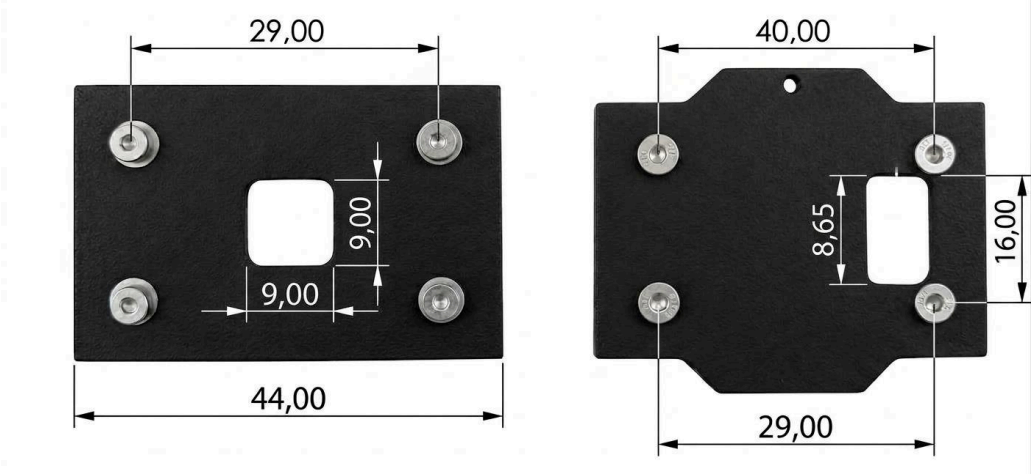



**Figura 5.4.** Elementos de la estructura mecánica después del mecanizado y del acabado superficial.

### 5.1.3 Acabado superficial

Después del mecanizado, la estructura recibe un acabado negro mate con la finalidad de disminuir reflexiones internas que puedan producir iluminación adicional sobre los elementos fotosensibles. Su contribución sobre la respuesta angular no se caracteriza de

manera independiente; por esta razón se describe únicamente como una decisión de implementación orientada a reducir luz reflejada dentro del conjunto.

El acabado utilizado tampoco se considera evidencia de compatibilidad con el ambiente espacial, ya que no se realizan ensayos específicos de vacío, desgasificación, ciclos térmicos o radiación sobre el recubrimiento.

### 5.1.4 Integración final

Una vez fabricadas la PCB, la base y la tapa, se realiza la integración del conjunto. La tarjeta se fija dentro de la estructura y la tapa se coloca de forma que la apertura quede ubicada sobre el arreglo fotosensible.

Durante el diseño se utiliza una separación nominal entre el plano de la apertura y el plano fotosensible de

$$h_{nom} = 2.4\ mm \tag{5.3}$$

Este valor representa la intención nominal de diseño y no se adopta automáticamente como dimensión final del prototipo. La geometría utilizada en la evaluación definitiva debe corresponder con la dimensión verificada en el CAD final o mediante medición del conjunto construido. La Figura 5.5 muestra el sensor después de completar la integración.

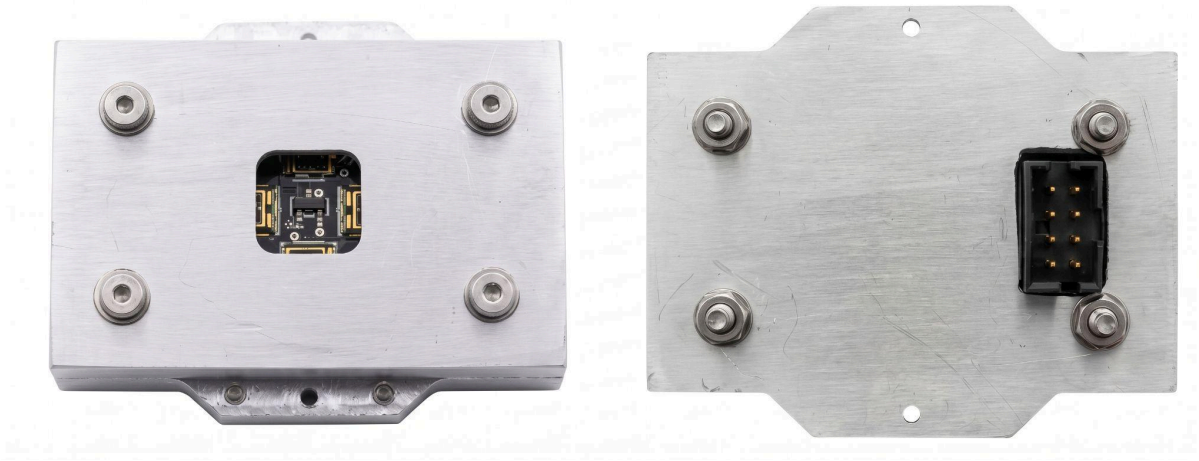


**Figura 5.5.** Prototipo del sensor de Sol completamente ensamblado.

### 5.1.5 Verificación inicial de la respuesta eléctrica

Antes de realizar los barridos angulares se comprueba que los canales fotosensibles produzcan señales compatibles con la etapa de adquisición. Durante pruebas con una fuente de banda ancha se reporta una corriente del orden de

$$I \approx 2\,mA \tag{5.4}$$

Este valor se considera una medición realizada durante el desarrollo del prototipo y no una extrapolación de la condición monocromática indicada en la hoja de datos del fotodiodo.

Aunque durante los ensayos experimentales en el laboratorio, se verificó la magnitud de las señales eléctricas producidas por los fotodiodos al ser expuestos a la fuente de iluminación. Los valores máximo de voltaje finales obtenidos en la interfaz resultaron en el intervalo de $0.7V$ a $0.8V$.

Para la resistencia de sensado $R_S = 5\,\Omega$ y una ganancia nominal G = 200 V/V, la relación eléctrica del canal se expresa como

$$V_o = G\,R_s\,I = 1000\,I \tag{5.5}$$

Por lo que, a partir del voltaje máximo medido empíricamente ($V_o \approx 0.8V$), es posible deducir que la fotocorriente máxima generada por las celdas bajo las condiciones de iluminación del banco de pruebas fue del orden de:

$$I = \frac{V_o}{1000} \approx 0.8\,mA \tag{5.6}$$

Los voltajes máximos registrados durante las pruebas se mantuvieron por debajo del intervalo de saturación de la etapa de adquisición. En consecuencia, bajo las condiciones evaluadas no se observó recorte ni saturación eléctrica de la etapa analógica o del convertidor analógico-digital.

## 5.2 Metodología experimental

La caracterización experimental se realiza mediante un banco de pruebas que permite modificar la orientación del prototipo respecto a una fuente fija de iluminación y registrar las señales generadas por el sensor junto con una referencia angular experimental.

$$\begin{gathered} fuente\ de\ iluminación\ +\ prototipo \\ +\ adquisición\ +\ referencia\ angular \\ +\ registro \end{gathered} \tag{5.7}$$

El objetivo del procedimiento es obtener, para diferentes orientaciones dentro del intervalo de prueba, las señales de los cuatro fotodiodos y relacionarlas posteriormente con las componentes angulares de incidencia. Las pruebas se realizan en condiciones de laboratorio y, por tanto, describen el comportamiento del prototipo dentro del banco utilizado.

### 5.2.1 Banco de pruebas

Durante los barridos, la fuente de iluminación permanece fija y el prototipo se coloca sobre un soporte que permite modificar su inclinación respecto a la dirección incidente.

Se utilizó una fuente luminosa capaz de imitar de cierta forma las condiciones de iluminación del espacio exterior, conocida como fuente de iluminación utilizada en el banco. Dado que la atmósfera terrestre bloquea y atenúa significativamente gran parte de la radiación proveniente del Sol, las pruebas en tierra requieren de una lámpara que aproxime el valor de la constante solar y cuyo intervalo espectral sea compatible con el de los elementos fotodetectores.

Para realizar los barridos se utilizó una lámpara halógena General Electric modelo CYX, con potencia nominal de 2000 W, como fuente de iluminación del banco experimental. Durante las pruebas se colocó a una distancia aproximada de 80 cm respecto a la cara principal del sensor.

Las fotografías de la Figura 5.6 muestran la fuente empleada, mientras que la Figura 5.7 presenta el montaje general del banco.

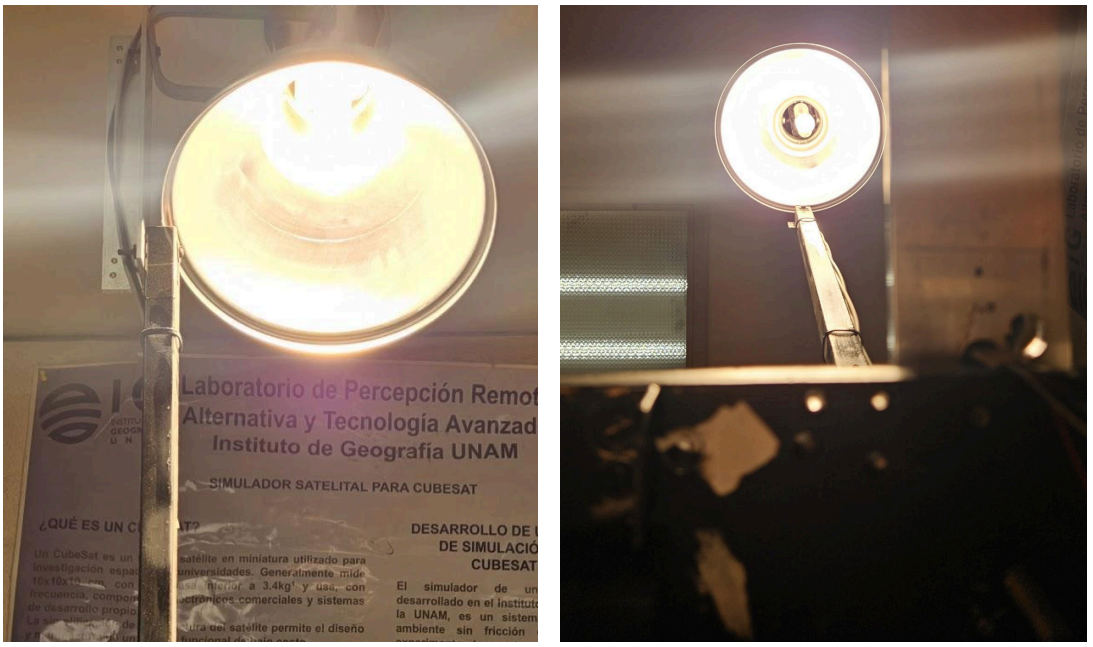



**Figura 5.6.** Fuente de iluminación utilizada durante la caracterización: vistas del montaje y de la fuente.

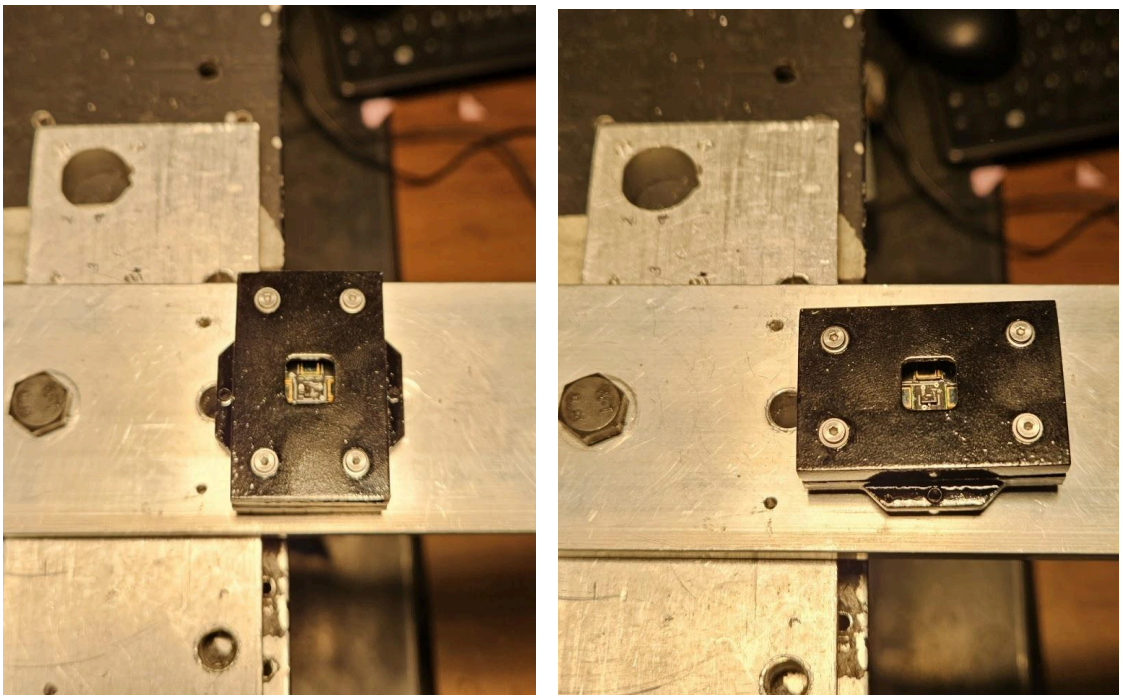


**Figura 5.7**. Banco experimental utilizado para realizar los barridos angulares.

### 5.2.2 Referencia angular experimental

La orientación del prototipo se registra mediante un MPU6050 conectado a un Arduino Nano. La señal del sensor inercial se procesa mediante un filtro complementario y se utiliza como referencia angular durante los barridos.

$$MPU6050 \rightarrow filtro\ complementario \rightarrow \theta_{ref} \tag{5.8}$$

La posición inicial se establece utilizando una superficie considerada horizontal y una herramienta de nivel para verificar el montaje antes de iniciar las pruebas. Debido a que el conjunto MPU6050-Arduino Nano no fue caracterizado metrológicamente de manera independiente, sus lecturas se emplean como referencia angular experimental y no como una referencia angular absoluta.

### 5.2.3 Adquisición de las señales

Las señales acondicionadas de los cuatro fotodiodos se digitalizan mediante el ADC interno de 12 bits del MSPM0C1104. Una entrada adicional se utiliza para registrar la señal del TMP236 como variable auxiliar de temperatura. La Tabla 5.1 resume la asignación documentada de las entradas durante las pruebas.

| Canal | Pin | Asociación documentada |
|---|---|---|
| ADC1 | PA27 | Par superior (U) |
| ADC2 | PA28 | Par inferior (D) |
| ADC3 | PA24 | Par izquierda (L) |
| ADC4 | PA25 | Par derecha (R) |
| Temperatura | PA16 | Canal auxiliar |

**Tabla 5.1.** Asignación documentada de las entradas ADC durante las pruebas.

La documentación experimental permite asociar ADC1 y ADC2 con el par superior-inferior y ADC3 y ADC4 con el par izquierda-derecha.

### 5.2.4 Alineación temporal de los registros

El prototipo y la referencia angular transmiten información mediante interfaces seriales independientes. Una herramienta desarrollada en Python reúne ambas secuencias utilizando el tiempo de recepción para asociar los registros. Debido a esta arquitectura, el procedimiento se describe como alineación temporal de registros y no como sincronización metrológica exacta.

$$M_k = \{t_k, N_{R,k}, N_{L,k}, N_{U,k}, N_{D,k}, T_k, \theta_{ref,k}\} \tag{5.9}$$

La expresión anterior representa la estructura conceptual del registro una vez confirmada la asignación definitiva de los canales. Si los archivos originales conservan las denominaciones ADC1-ADC4, éstas se mantienen durante el procesamiento y se sustituyen por R/L/U/D únicamente después de verificar el mapa.

### 5.2.5 Configuraciones de prueba

La caracterización comprende dos barridos principales. En la documentación experimental, el primero se identifica como pitch y el segundo como roll. En ambos casos se modifica la orientación del prototipo aproximadamente entre -23° y +23°. Para el segundo barrido, el

sensor se gira aproximadamente 90° respecto a la primera configuración para evaluar la respuesta asociada con el eje perpendicular. La Figura 5.8 muestra la disposición utilizada durante el procedimiento experimental.



**Figura 5.8.** Configuración utilizada durante los barridos angulares del prototipo, donde la inclinación hacia la izquierda marca -X para pitch o -Y para roll, y hacia la derecha +X para pitch o +Y para roll, dependiendo de cuál era el caso.

### 5.2.6 Procedimiento por posiciones

Los barridos se realizan mediante posiciones cuasiestáticas. En cada orientación el prototipo permanece durante varios segundos con la finalidad de adquirir múltiples muestras antes de modificar nuevamente la posición. Para una magnitud X registrada en la posición j se utiliza el promedio

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n_j}\sum X_{j,k} \tag{5.10}$$

El promediado proporciona un valor representativo de cada escalón angular y reduce la dispersión aleatoria entre muestras consecutivas. Esta operación no se interpreta por sí misma como una demostración formal de repetibilidad, ya que para ello serían necesarios ensayos independientes con reposicionamiento del sistema.

## 5.3 Calibración

La calibración tiene como finalidad establecer experimentalmente la relación entre las señales normalizadas generadas por los pares de fotodiodos y las componentes angulares registradas mediante la referencia experimental. El modelo del Capítulo III explica la relación física entre el desplazamiento de la proyección, las áreas iluminadas y los índices normalizados, mientras que la calibración incorpora las particularidades del prototipo real.

### 5.3.1 Señales diferenciales normalizadas

Para cada muestra, las lecturas correspondientes a los detectores opuestos se combinan mediante las relaciones normalizadas definidas previamente. Para el eje $S_x$ se utiliza

$$S_x = \frac{N_R - N_L}{N_R + N_L} \tag{5.11}$$

y para el eje $S_y$

$$S_y = \frac{N_U - N_D}{N_U + N_D} \tag{5.12}$$

La normalización reduce la influencia de factores multiplicativos aproximadamente comunes a ambos canales de cada par, sin implicar independencia absoluta respecto a la irradiancia ni eliminar diferencias individuales de responsividad, ganancia u offset.

### 5.3.2 Obtención de las curvas de calibración

Los datos se agrupan por posiciones angulares y se calculan valores promedio. A partir de ellos se construyen las curvas experimentales correspondientes a ambos ejes, de forma general

$$S_x = f_x(\theta_x), \qquad S_y = f_y(\theta_y) \tag{5.13}$$

Las Figuras 5.9 y 5.10 muestran las curvas de calibración conservando las denominaciones pitch y roll empleadas en los registros originales.

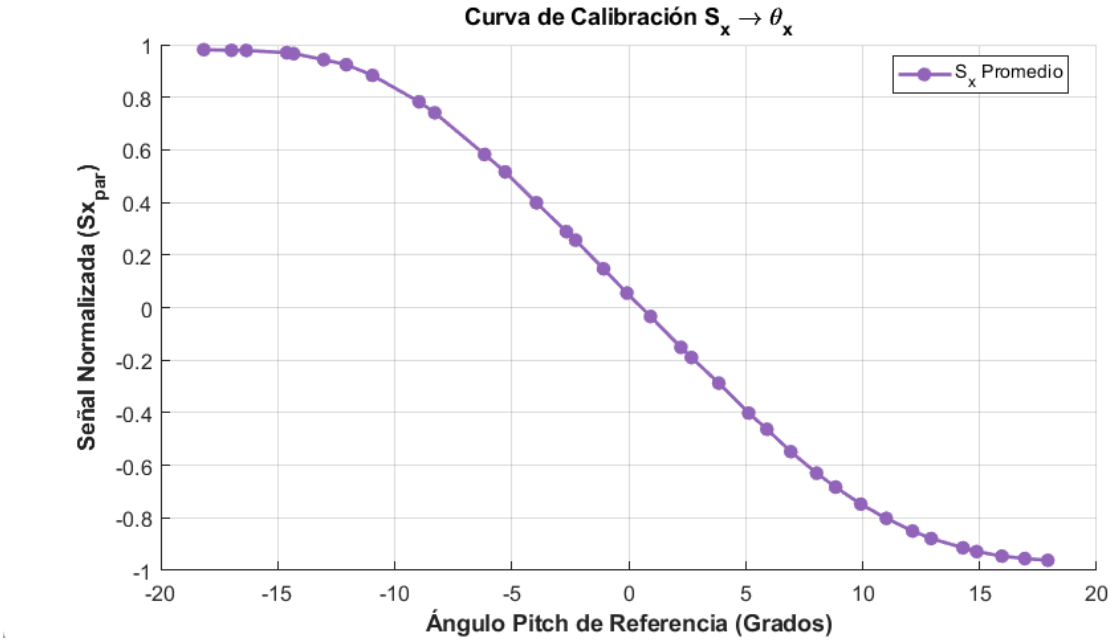



**Figura 5.9.** Curva de calibración promediada de la señal normalizada correspondiente al primer barrido, identificado originalmente como pitch.

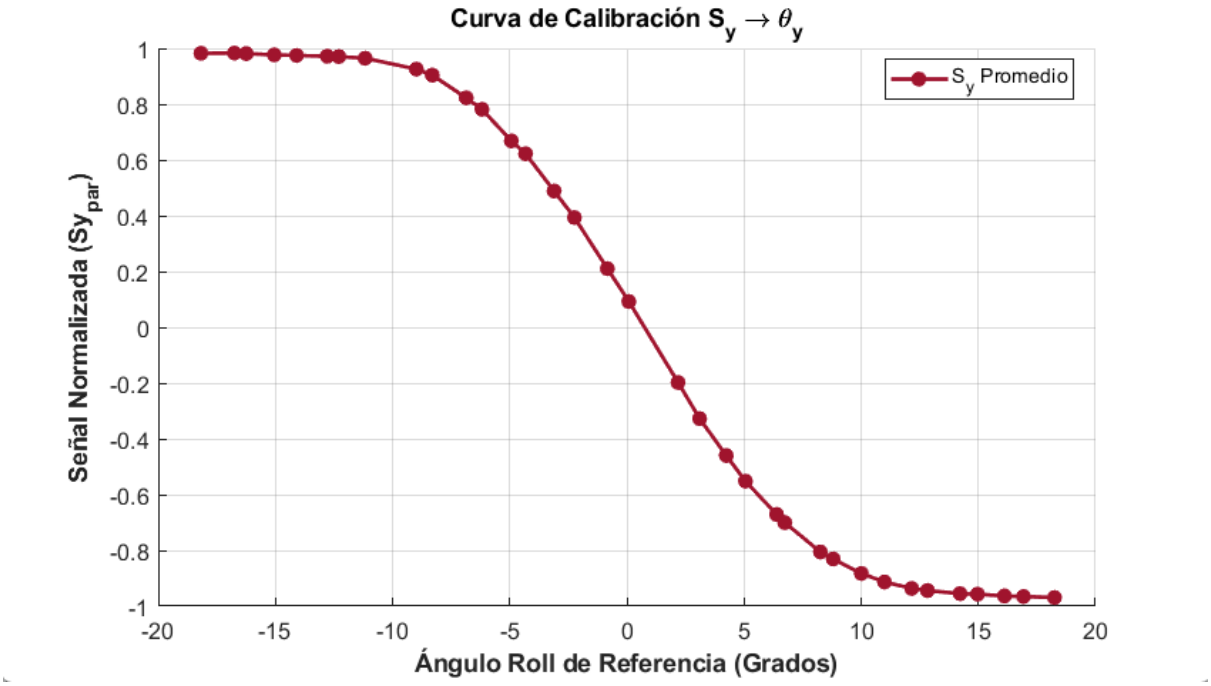



**Figura 5.10.** Curva de calibración promediada de la señal normalizada correspondiente al segundo barrido, identificado originalmente como roll.

La respuesta no mantiene una sensibilidad constante en todo el recorrido angular. En la región central la pendiente es mayor, mientras que hacia los extremos la señal se aproxima progresivamente a sus límites. Por esta razón, una única relación lineal no representa adecuadamente todo el intervalo de operación.

### 5.3.3 Interpolación experimental

Debido a la pérdida de linealidad hacia los extremos, las relaciones de calibración se implementan mediante tablas de búsqueda construidas a partir de los datos experimentales. Estas tablas permiten obtener las componentes angulares a partir de los índices normalizados mediante interpolación experimental.

$$\hat{\theta}_x = F_{x,cal}(S_x), \qquad \hat{\theta}_y = F_{y,cal}(S_y) \tag{5.14}$$

Las Figuras 5.11 y 5.12 presentan los interpoladores experimentales correspondientes a los dos barridos.

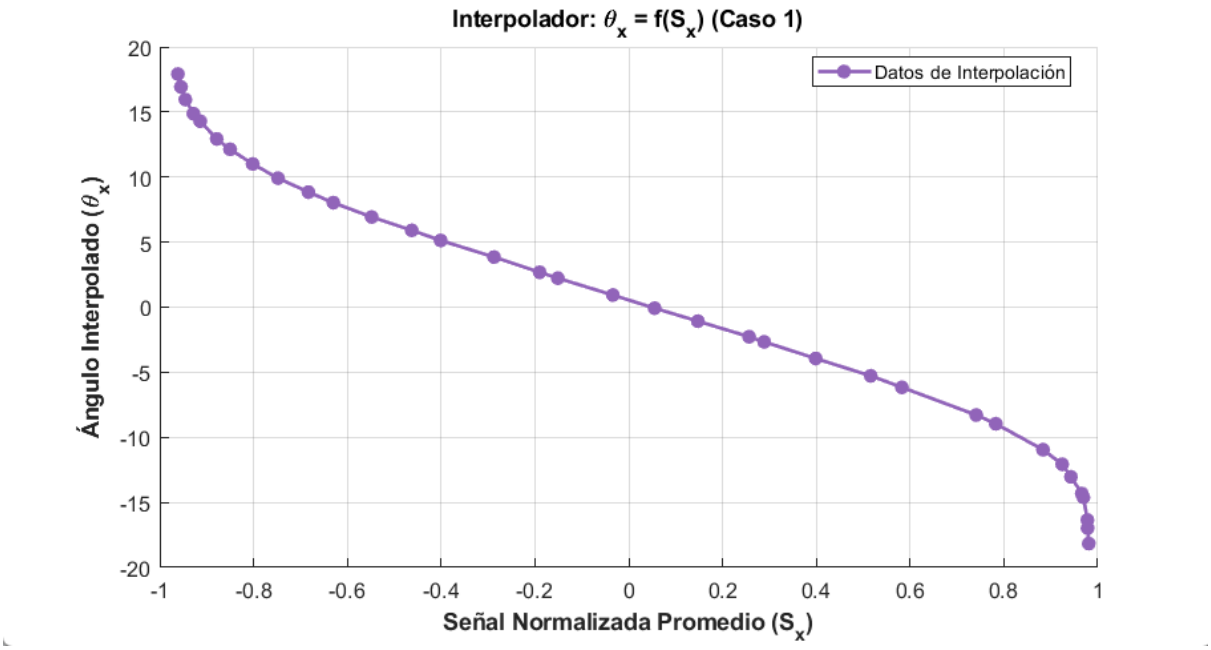



**Figura 5.11**. Interpolador experimental utilizado para el primer eje de medición.

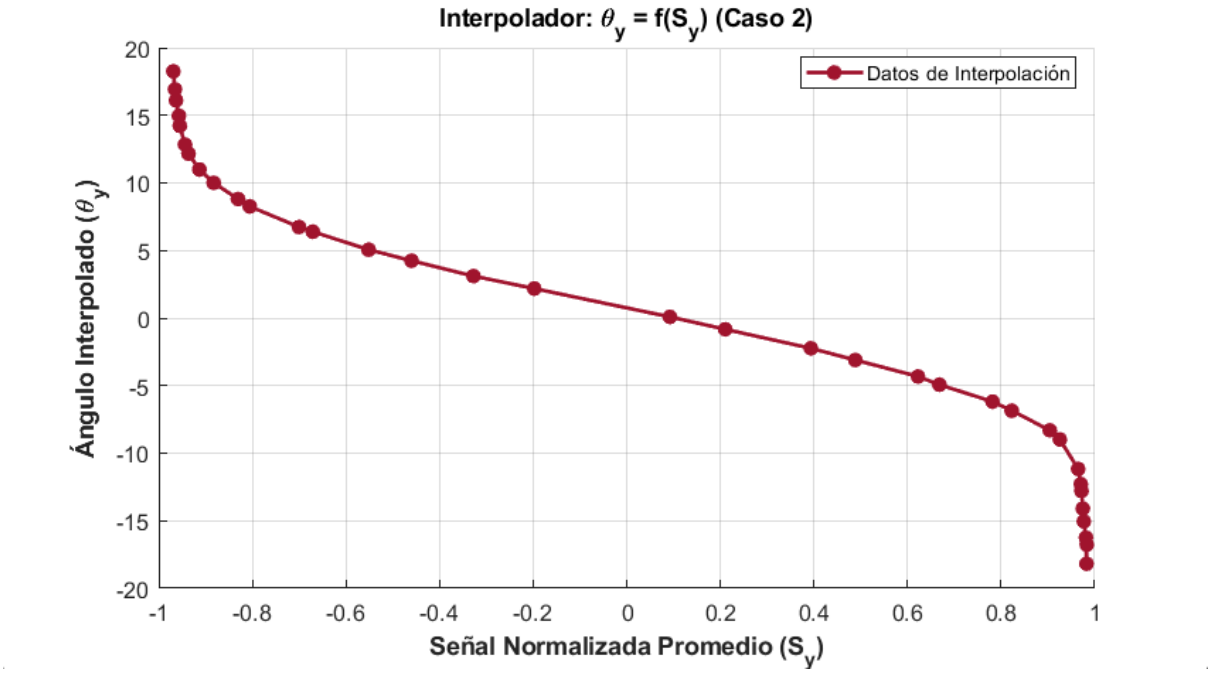



**Figura 5.12.** Interpolador experimental utilizado para el segundo eje de medición.

### 5.3.4 Incorporación al microcontrolador

Las relaciones obtenidas experimentalmente se almacenan en la memoria del MSPM0C1104 y se utilizan para convertir las señales normalizadas en estimaciones angulares. El procesamiento final puede resumirse como

$$N_R, N_L, N_U, N_D \rightarrow S_x, S_y \rightarrow LUT \rightarrow \hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y \rightarrow S_S \quad (5.15)$$

La calibración no sustituye al modelo geométrico. El modelo describe la física de la respuesta, mientras que las tablas de calibración establecen la relación experimental

utilizada por el prototipo real para transformar los índices normalizados en estimaciones angulares.

Para evaluar el error de reconstrucción sobre el conjunto de calibración del sistema, el análisis de error se calculó aplicando el algoritmo de interpolación sobre los mismos conjuntos de datos experimentales empleados para la construcción de las tablas de calibración (registros correspondientes al Caso 1 para el eje $x_S$ y al Caso 2 para el eje $y_S$).

En consecuencia, las gráficas de error obtenidas representan el error de reconstrucción propio del modelo; es decir, cuantifican la desviación residual que presenta el método de interpolación geométrica al intentar recuperar el ángulo original a partir de la curva promedio, verificando así la correcta ejecución del algoritmo estructurado en el firmware.

## 5.4 Caracterización experimental

La caracterización se realiza a partir de las señales adquiridas durante los barridos angulares. El análisis considera tanto la respuesta individual de los canales fotosensibles como las variables normalizadas y la reconstrucción de la dirección solar.

### 5.4.1 Respuesta de los canales fotosensibles

Durante el primer barrido, los canales ADC3 y ADC4 presentan la mayor variación, mientras que durante el segundo la respuesta dominante corresponde a ADC1 y ADC2. En ambos casos se observa una evolución complementaria de las señales del par activo, consistente con el desplazamiento de la proyección sobre detectores opuestos.

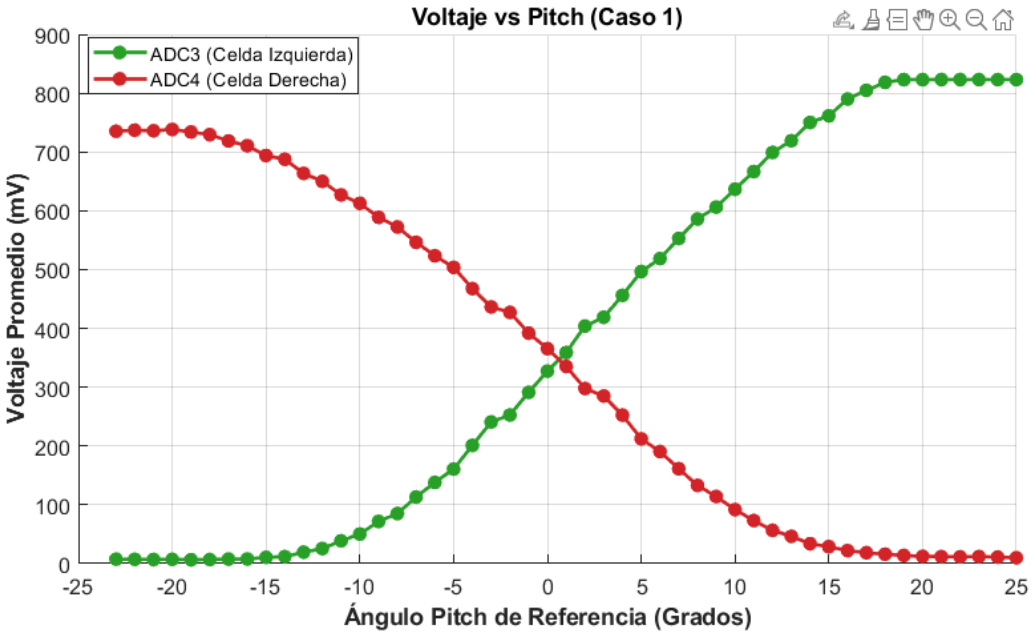



**Figura 5.13.** Voltajes promedio de los canales dominantes durante el primer barrido, identificado originalmente como pitch.

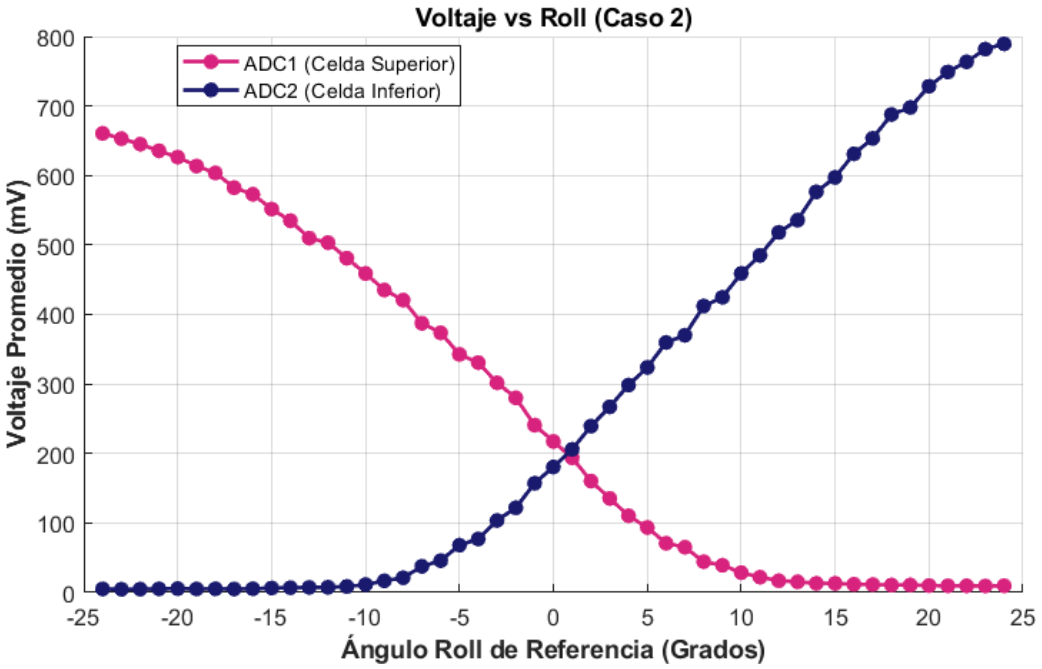



**Figura 5.14.** Voltajes promedio de los canales dominantes durante el segundo barrido, identificado originalmente como roll.

La predominancia de pares diferentes es consistente con la separación funcional de los dos ejes proporcionada por la disposición en cruz. No se afirma eliminación total del acoplamiento entre ejes mientras dicha característica no sea cuantificada mediante un ensayo independiente.

### 5.4.2 Respuesta normalizada y sensibilidad

Las curvas experimentales muestran una región próxima a la incidencia normal con mayor variación de la señal normalizada por unidad angular. Hacia los extremos, la pendiente disminuye progresivamente y los índices se aproximan a valores cercanos a ±1.

$$S_x \approx a_x \theta_x + b_x, \qquad S_y \approx a_y \theta_y + b_y \tag{5.16}$$

La representación lineal anterior se interpreta únicamente como una aproximación local. La sensibilidad experimental se expresa mediante

$$K_{\theta_x,exp} = \frac{dS_x}{d\theta_x}, \qquad K_{\theta_y,exp} = \frac{dS_y}{d\theta_y} \tag{5.17}$$

La determinación numérica final de estas magnitudes debe realizarse a partir de los archivos experimentales, utilizando el mismo sistema de referencia adoptado para cada eje. Durante algunas pruebas se observaron variaciones de iluminación; la continuidad de las señales normalizadas bajo estas condiciones es compatible con la reducción de factores multiplicativos comunes prevista por el modelo, pero no constituye una caracterización formal de invariancia frente a irradiancia.

### 5.4.3 Intervalo angular observado

Durante la caracterización, es necesario distinguir formalmente entre tres magnitudes angulares diferentes para evitar ambigüedades entre el movimiento mecánico, la predicción teórica y el resultado empírico.

En primer lugar, el barrido físico del hardware en el banco de pruebas abarca un recorrido mecánico aproximado entre $-23°$ y $+23°$. Este intervalo corresponde únicamente a la capacidad de movimiento del soporte utilizado durante las pruebas experimentales y no se identifica automáticamente con el rango de medición válido del instrumento.

En segundo lugar, el modelo geométrico ideal establece para la configuración final un límite teórico de respuesta de $\pm\ 15.583°$ para ambos ejes. Esta métrica representa la frontera matemática estricta antes de alcanzar la condición extrema del modelo.

Finalmente, los datos empíricos permiten establecer el intervalo de respuesta observado. A partir del procesamiento de las señales experimentales se identificaron límites de respuesta entre $-\ 16.977°$ y $+\ 17.913°$ para $x_S$, y entre $-\ 15.050°$ y $+\ 18.251°$ para $y_S$. Estos valores se reportan como intervalos de respuesta observados durante los barridos y no como una equivalencia directa del límite geométrico ideal previsto por el modelo.

En consecuencia, las curvas de calibración y la evaluación de desempeño del sensor se restringen estrictamente a estos intervalos de respuesta observados, descartando los ángulos extremos del barrido físico experimental.

### 5.4.4 Reconstrucción de la dirección solar

A partir de las estimaciones angulares, el procesamiento embebido reconstruye la dirección solar en el sistema de referencia del sensor. Las Figuras 5.15 y 5.16 presentan las componentes obtenidas durante los dos barridos.

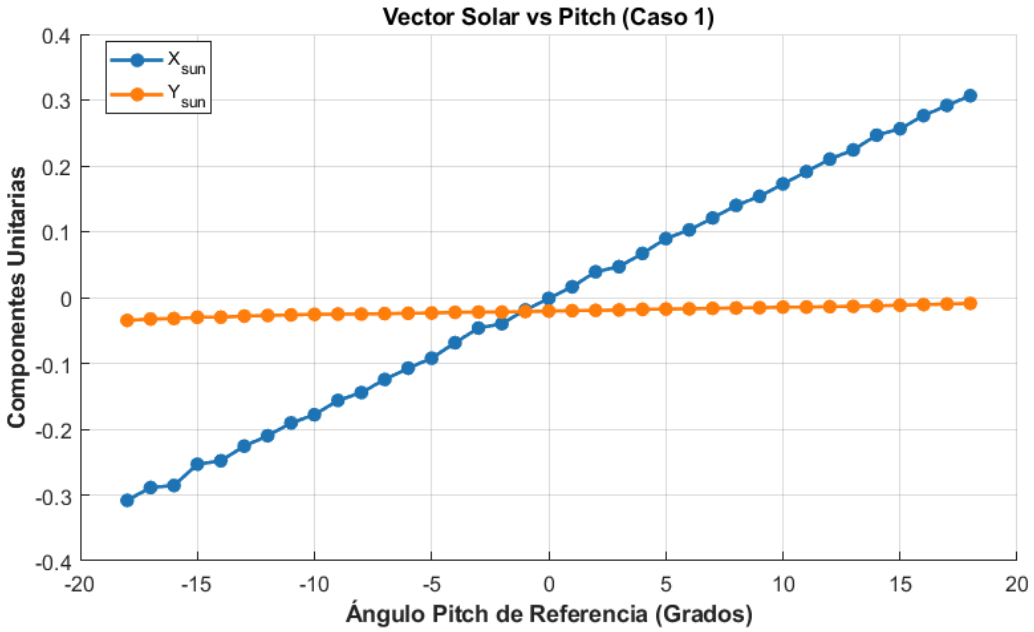



**Figura 5.15.** Componentes de la dirección solar reconstruida durante el primer barrido, identificado originalmente como pitch.

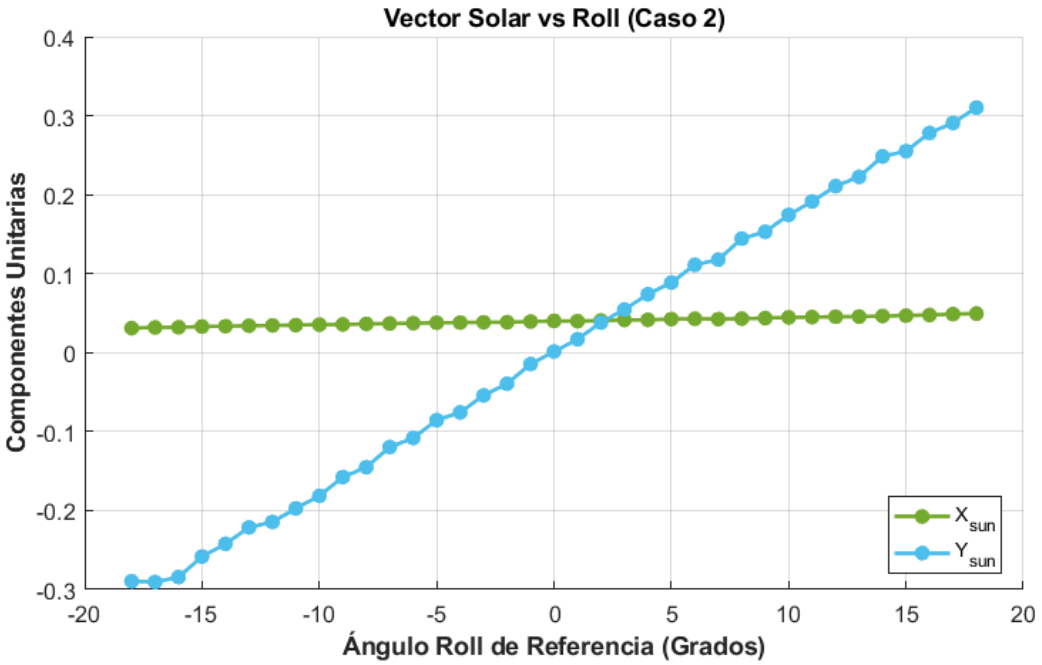



**Figura 5.16.** Componentes de la dirección solar reconstruida durante el segundo barrido, identificado originalmente como roll.

Estas gráficas constituyen una verificación funcional de la reconstrucción vectorial. La exactitud angular se analiza por separado mediante la comparación entre las estimaciones y la referencia experimental.

## 5.5 Error angular

El desempeño angular se evalúa mediante la diferencia entre las componentes angulares estimadas por el sensor y las obtenidas con la referencia angular experimental. Para cada muestra k se definen

$$e_{\theta_x,k} = \hat{\theta}_{x,k} - \theta_{x,ref,k} \tag{5.18}$$

$$e_{\theta_y,k} = \hat{\theta}_{y,k} - \theta_{y,ref,k} \tag{5.19}$$

El signo del error se conserva para identificar desplazamientos respecto a la referencia. Debido a que el MPU6050 no fue caracterizado metrológicamente de manera independiente, estas diferencias representan el desempeño relativo del prototipo dentro del banco utilizado y no la exactitud angular absoluta del instrumento. Las Figuras 5.17 y 5.19 muestran la comparación entre el ángulo estimado y la referencia experimental para los dos barridos, mientras que las Figuras 5.18 y 5.20 presentan los residuos correspondientes.

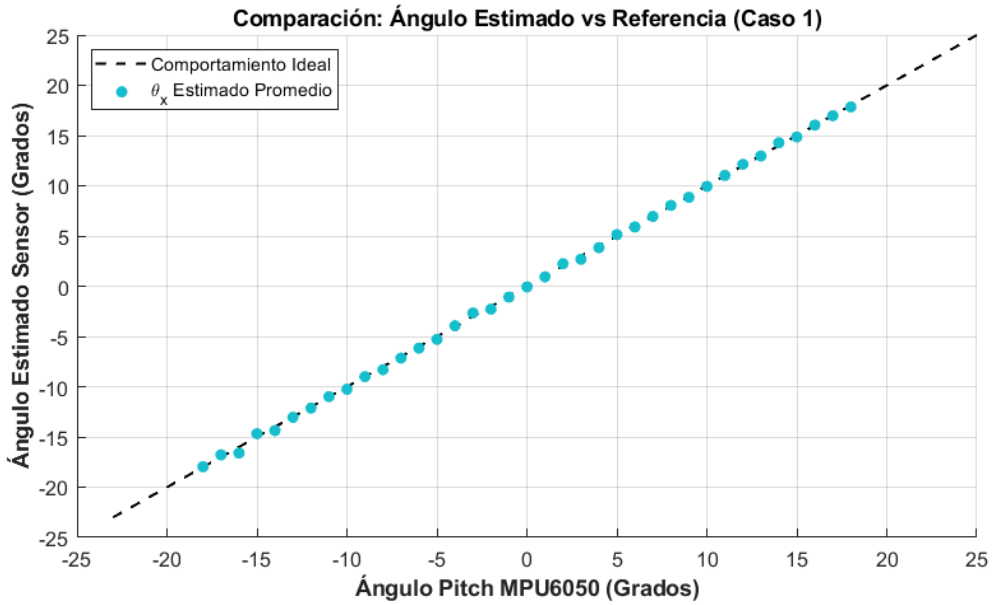



**Figura 5.17.** Ángulo estimado frente a la referencia angular experimental durante el primer barrido.

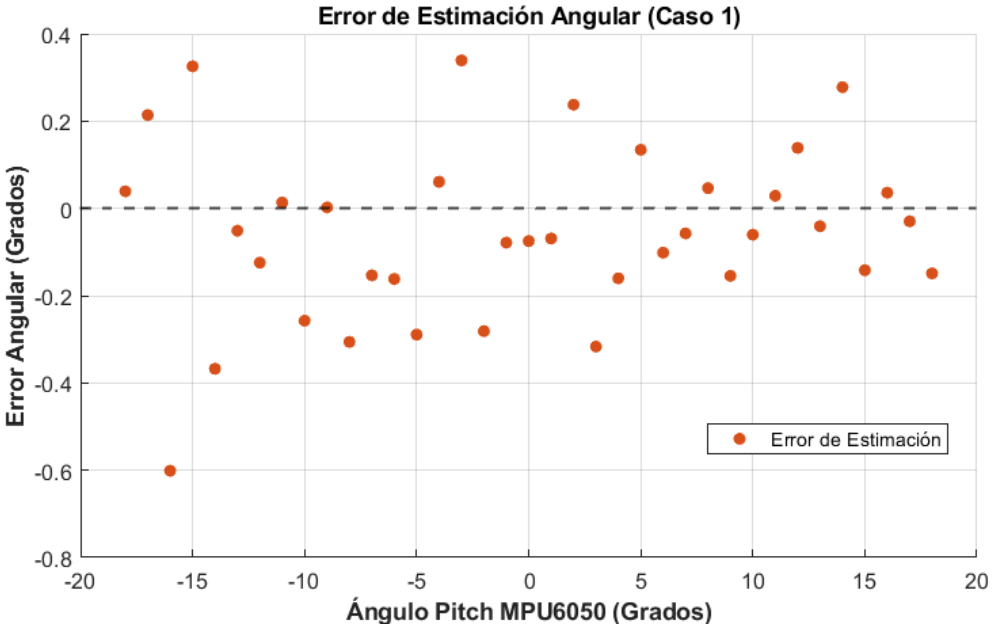



**Figura 5.18.** Error angular residual respecto a la referencia experimental durante el primer barrido.

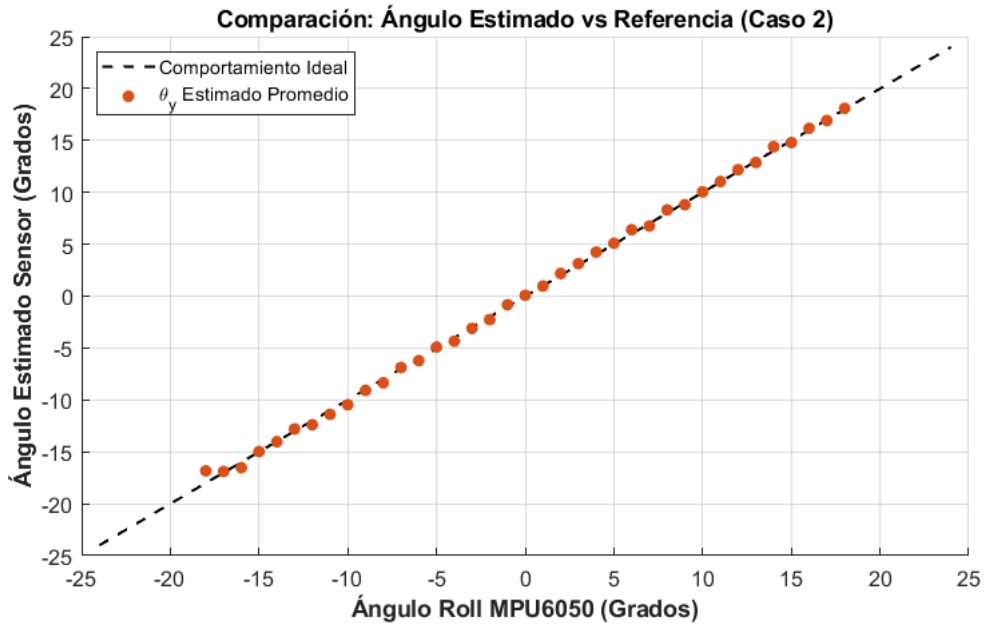



**Figura 5.19.** Ángulo estimado frente a la referencia angular experimental durante el segundo barrido.

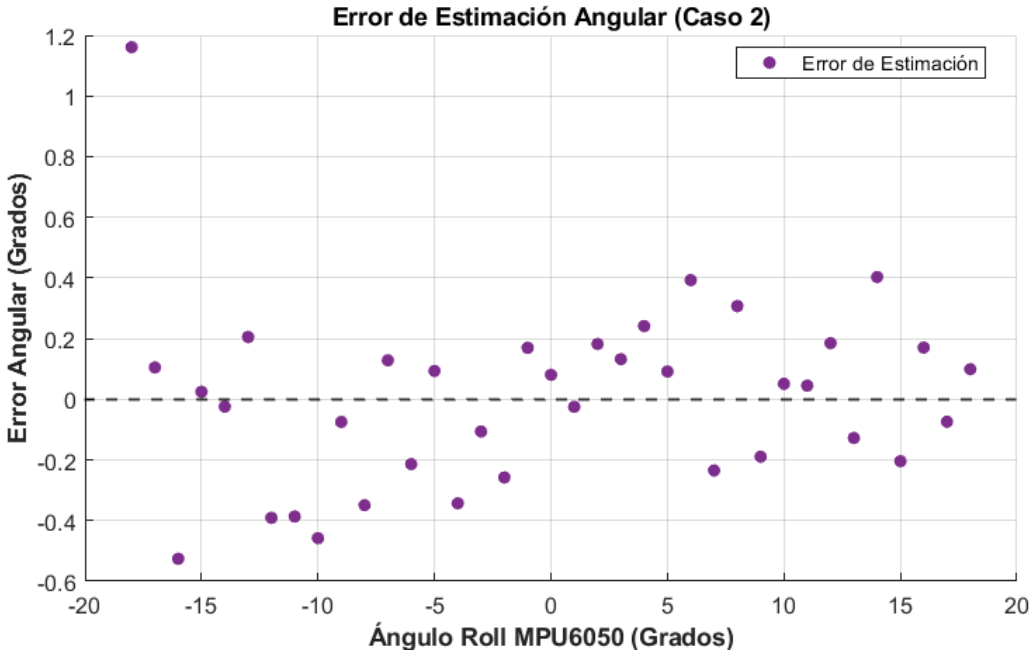



**Figura 5.20.** Error angular residual respecto a la referencia experimental durante el segundo barrido.

La evaluación cuantitativa definitiva se obtiene a partir de los archivos experimentales originales y no mediante inspección visual de las gráficas. Para cada eje se calculan el error medio, la desviación estándar muestral, el error cuadrático medio y el máximo error absoluto. Es indispensable señalar de manera explícita que estas métricas numéricas fueron calculadas evaluando el algoritmo sobre el mismo conjunto de datos experimentales empleado para construir las tablas de búsqueda (LUT). Por lo tanto, los valores obtenidos cuantifican el error de reconstrucción intrínseco del modelo de interpolación implementado y no constituyen una validación independiente con un conjunto de datos nuevo.

$$\bar{e}_{\theta} = \frac{1}{n}\sum e_{\theta,k} \tag{5.20}$$

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum\left(e_{\theta,k} - e^{-}_{\theta}\right)^2} \tag{5.21}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum e^2_{\theta,k}} \tag{5.22}$$

$$e_{max} = max\left|e_{\theta,k}\right| \tag{5.23}$$

| Métrica | Eje $x_S$ | Eje $y_S$ |
|---|---|---|
| Error medio, $e_\theta$ | - 0.0724º | 0.0235º |
| Desviación estándar, $\sigma_\theta$ | 0.1885º | 0.1874º |
| RMSE | 0.1967º | 0.1802º |
| Máximo $\left\|e_\theta\right\|$ | 0.3391º | 0.3430º |
| Intervalo evaluado | [- 8.00º, 8.00º] | [- 5.00º, 5.00º] |
| Número de muestras, n | 17 | 11 |

**Tabla 5.2.** Métricas de error angular respecto a la referencia experimental.

## 5.6 Comparación modelo–experimento

La comparación entre el modelo y los resultados experimentales se realiza en dos niveles. El primero analiza la correspondencia entre la respuesta prevista a partir de la geometría del instrumento y las señales normalizadas observadas. El segundo compara el sensor calibrado con la referencia angular experimental.

### 5.6.1 Modelo geométrico frente a respuesta física

El modelo desarrollado en el Capítulo III y particularizado en el Capítulo IV establece la secuencia

$$\left(\theta_x, \theta_y\right) \rightarrow (\Delta x, \Delta y) \rightarrow \left(A_R, A_L, A_U, A_D\right) \rightarrow \left(S_x, S_y\right) \tag{5.24}$$

Para la geometría final del instrumento, el programa de MATLAB permite obtener las funciones previstas

$$\begin{aligned} S_{x,modelo} &= f_x\left(\theta_x\right) \\ S_{y,modelo} &= f_y\left(\theta_y\right) \end{aligned} \tag{5.25}$$

y los datos experimentales proporcionan las relaciones $S_{x\,,\,exp}\left(\theta_x\right)$ y $S_{y\,,\,exp}\left(\theta_y\right)$.

A partir de la geometría final completa y de los archivos de barrido empírico, ambas respuestas se representan sobre los mismos ejes angulares. Los parámetros geométricos no se ajustaron con el propósito de forzar la coincidencia con los datos experimentales, si no que la comparación emplea la geometría medida y documentada del ensamble junto con la región fotosensible cuadrada equivalente adoptada por el modelo ideal.

Al emplear estas dimensiones definitivas respaldadas por el diseño, el análisis permitió contrastar el modelo numérico con la evidencia física y confirmar su nivel de

correspondencia con las tendencias generales previstas. La Tabla 5.3 resume estas correspondencias observadas empíricamente.

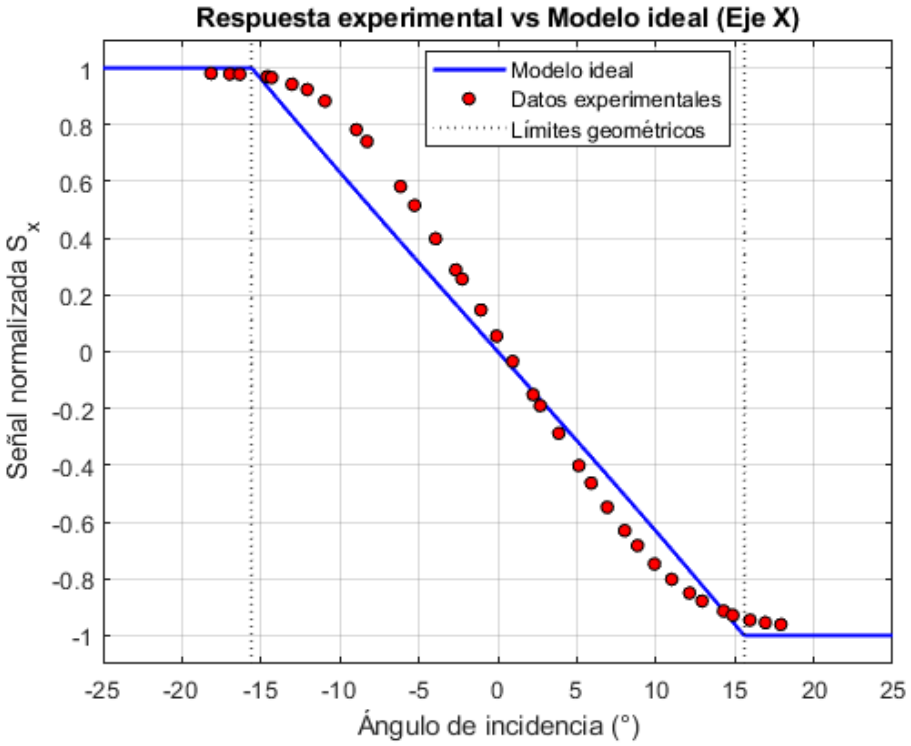



**Figura 5.21.** Comparación entre la respuesta normalizada prevista por el modelo y la respuesta experimental del primer eje.

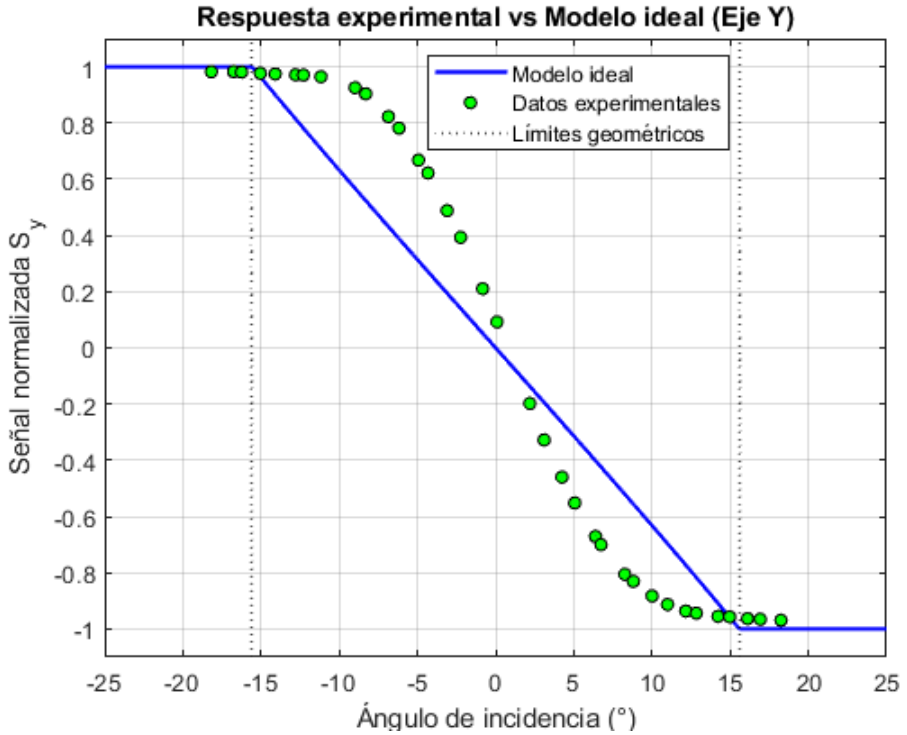



**Figura 5.22.** Comparación entre la respuesta normalizada prevista por el modelo y la respuesta experimental del segundo eje

Si no se dispone de las dimensiones activas respaldadas por el diseño, no se genera artificialmente una curva numérica del modelo. En este trabajo, al contar con la geometría final, la comparación se establece formalmente como una concordancia cualitativa y tendencial, demostrando que el prototipo físico sigue el comportamiento previsto, aunque sin afirmar una coincidencia numérica exacta debido a las no idealidades. La Tabla 5.3 resume estas correspondencias.

| Predicción del modelo | Observación experimental |
|---|---|
| Desplazamiento de la proyección con el ángulo | Variación progresiva de las señales de los canales |
| Respuesta complementaria entre detectores opuestos | Un canal aumenta mientras el opuesto disminuye |
| Separación funcional de los dos ejes | Pares diferentes presentan la respuesta dominante en cada barrido |
| Mayor sensibilidad cerca de incidencia normal | Mayor pendiente de $S_x$ y $S_y$ en la región central |
| Límite geométrico extremo de la respuesta normalizada ($S \rightarrow \pm 1$) | Aproximación experimental de $S_x$ y $S_y$ a valores constantes extremos, confirmando el fin del intervalo útil empírico |

**Tabla 5.3.** Correspondencia entre el comportamiento previsto por el modelo y la respuesta experimental.

### 5.6.2 Comparación de parámetros angulares

Además de comparar las curvas completas, el modelo y el experimento pueden contrastarse mediante los límites angulares, la sensibilidad alrededor de la incidencia normal y la región útil obtenida. Para realizar esta comparación correctamente, es necesario establecer una distinción conceptual: el modelo establece el límite geométrico ideal de la proyección, mientras que el experimento reporta el intervalo de respuesta observado físicamente durante los barridos, sin que esto se traduzca de forma directa en una saturación geométrica equivalente. La Tabla 5.4 contrasta los resultados previstos teóricamente para la configuración final frente al comportamiento extraído de los datos experimentales.

| Magnitud | $x_S$ Modelo (Límite geométrico ideal) | $x_S$ Experimento (Intervalo observado) | $y_S$ Modelo (Límite geométrico ideal) | $y_S$ Experimento (Intervalo observado) |
|---|---|---|---|---|
| Límite negativo | -15.583º | -16.977º | -15.583º | - 15.050º |
| Límite positivo | 15.583º | 17.913º | 15.583º | 18.251º |
| Intervalo angular | 31.165º totales | 34.890º totales | 31.165º totales | 33.301º totales |
| $K_\theta(0)$ | -0.06258 1/° | - 0.090263 1/° | -0.06258 1/° | - 0.128862 1/deg |
| Región aproximadamente lineal | No asignada analíticamente | [- 6.160º, 8.030º] | No asignada analíticamente | [- 4.324º, 6.389º] |

**Tabla 5.4.** Comparación entre el comportamiento previsto y el comportamiento experimental.

### 5.6.3 Sensor calibrado frente a referencia experimental

La segunda comparación corresponde al instrumento después de incorporar las relaciones de calibración. Para una estimación ideal respecto a la referencia utilizada en el banco se cumple

$$\hat{\theta} = \theta_{ref} \tag{5.26}$$

Las Figuras 5.17 y 5.19 muestran esta relación y las Figuras 5.18 y 5.20 presentan los residuos. La distancia respecto a la igualdad se cuantifica mediante las métricas definidas en la Sección 5.5.

$$S_x, S_y \rightarrow F_{cal} \rightarrow \hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y \rightarrow e_\theta \tag{5.27}$$

La calibración no sustituye al modelo. El modelo explica la física de la respuesta y la disminución de sensibilidad hacia los extremos; la calibración incorpora las particularidades del prototipo real y permite convertir las señales normalizadas en estimaciones angulares.

## 5.7 Verificación funcional y discusión

A partir de la fabricación, integración, calibración y caracterización experimental se revisan las funciones previstas para el prototipo. Esta evaluación corresponde a una verificación funcional en condiciones de laboratorio y no constituye una certificación de desempeño ni una calificación para vuelo.

$$\begin{aligned} &captación \rightarrow acondicionamiento \rightarrow adquisición \\ &\rightarrow normalización \rightarrow estimación\ angular \\ &\rightarrow dirección\ solar \end{aligned} \tag{5.28}$$

### 5.7.1 Verificación de las funciones implementadas

La Tabla 5.5 resume el estado de las principales funciones evaluadas durante el desarrollo experimental.

| Función o característica | Estado |
|---|---|
| Adquisición de cuatro canales fotosensibles | Verificada |
| Adquisición auxiliar de temperatura | Verificada |
| Cálculo de $S_x$ y $S_y$ | Implementado |
| Estimación de $\hat{\theta}_x$ y $\hat{\theta}_y$ | Implementada mediante calibración |
| Tablas de interpolación (LUT) | Implementadas |
| Reconstrucción de $S_S$ | Verificada funcionalmente |
| Comunicación UART | Verificada |
| Respuesta angular en ambos ejes | Observada experimentalmente |
| Respuesta angular en el intervalo experimental | Caracterizada |
| Error angular | Cuantificado |
| Comparación cuantitativa modelo–experimento | Realizada |
| Validación ambiental | No realizada |

**Tabla 5.5.** Síntesis de la verificación funcional del prototipo.

El firmware final realiza la adquisición de los canales, el cálculo de las señales normalizadas, la interpolación angular y la reconstrucción de la dirección solar. La salida UART incluye las variables adquiridas, los índices normalizados, los ángulos estimados, las componentes de la dirección solar, la temperatura y una palabra de estado. La existencia de esta palabra se conserva como parte de la trama implementada, aunque no se considera verificada frente a todas las condiciones anómalas posibles mientras no existan ensayos específicos de cada bandera.

### 5.7.2 Discusión del comportamiento observado

Las mediciones muestran una respuesta diferencial entre los pares de elementos fotosensibles conforme se modifica el ángulo de incidencia. La mayor pendiente en la región central y la disminución progresiva de sensibilidad hacia los extremos son consistentes con el comportamiento previsto por el modelo geométrico. La calibración experimental permite transformar estas señales en estimaciones angulares sin implicar que el modelo represente de manera exacta todas las no idealidades del prototipo.

Al contar con la geometría final documentada y los datos experimentales incorporados, la comparación cuantitativa confirma la viabilidad del instrumento y expone las diferencias inherentes entre un modelo ideal y un prototipo físico. Las diferencias observadas entre la respuesta analítica y las mediciones pueden estar asociadas con efectos no incluidos explícitamente en el modelo ideal, entre ellos la distribución real de la iluminación, la formación de penumbra, las reflexiones internas, las tolerancias de alineación y las variaciones electrónicas de los canales. La contribución individual de estos efectos no fue caracterizada de manera independiente. En conjunto, los resultados verifican la operación funcional del instrumento dentro del banco de laboratorio y establecen formalmente su intervalo de respuesta válido.

### 5.7.3 Limitaciones experimentales

Los resultados obtenidos se limitan a las condiciones específicas del banco utilizado. Entre las principales restricciones se encuentran la caracterización incompleta de la fuente de iluminación, la referencia angular basada en MPU6050 sin calibración metrológica independiente, la alineación manual del montaje, el empleo de interfaces seriales independientes para el registro, la caracterización de un único prototipo y la ausencia de pruebas ambientales.

De igual forma, el procedimiento metodológico empleó el mismo conjunto de datos tanto para construir las tablas de calibración (LUT) como para evaluar posteriormente el error angular. Al confirmarse esta condición analítica, las métricas estadísticas obtenidas describen estrictamente el error de reconstrucción y la concordancia del interpolador con el conjunto utilizado para su construcción y no constituyen una validación independiente ante un conjunto de datos nuevos.

### 5.7.4 Alcance de la validación realizada

La validación desarrollada en este trabajo corresponde a pruebas experimentales en tierra. No se realizan ensayos de vacío, ciclos térmicos, vibración, choque o radiación. Por esta razón, los resultados no permiten establecer una calificación espacial ni afirmar que el instrumento se encuentre listo para vuelo.

El resultado de esta etapa se describe como un prototipo funcional validado experimentalmente en tierra.

### 5.7.5 Recapitulación del capítulo

En este capítulo se documenta la fabricación, integración y caracterización experimental del sensor de Sol desarrollado. La PCB y la estructura mecánica materializan la configuración

final establecida durante el diseño, mientras que las pruebas físicas muestran una variación diferencial de las señales en los elementos fotosensibles opuestos conforme cambia el ángulo de incidencia.

A partir de estas señales se calculan $S_x$ y $S_y$ , las tablas de calibración experimental permiten obtener $\widehat{\theta}_x$ y $\widehat{\theta}_y$ para posteriormente reconstruir la dirección solar $S_S$. La caracterización identifica una región central de mayor sensibilidad y una disminución progresiva de respuesta hacia los extremos del recorrido, acotando el intervalo de respuesta empírico a los límites angulares observados en el procesamiento de los datos. La evaluación cuantitativa del error (mediante el error medio, desviación estándar, RMSE y máximo error absoluto) demuestra la viabilidad del modelo de interpolación frente al conjunto de calibración. Finalmente, la comparación cuantitativa confirma que las tendencias físicas del prototipo presentan una concordancia cualitativa y tendencial sólida frente al comportamiento analítico previsto por la geometría final del modelo.

Capítulo

# VI

# Conclusiones y trabajo futuro

## 6.1 Cumplimiento de los objetivos y resultados principales

El objetivo general de este trabajo consistió en diseñar, implementar y validar experimentalmente en tierra un prototipo funcional de sensor de Sol analógico para plataformas nanosatelitales, tomando como referencia una configuración CubeSat 3U. Para ello se desarrolló una arquitectura basada en un arreglo en cruz de cuatro elementos fotosensibles y procesamiento local de las señales, destinada a obtener los ángulos de incidencia y reconstruir la dirección solar respecto al sistema de referencia del sensor, además de caracterizar el intervalo angular experimental y el error angular del instrumento.

El desarrollo realizado permitió alcanzar las etapas de modelado, diseño, fabricación, integración y validación funcional del prototipo. Durante las pruebas se verificó la adquisición de los cuatro canales fotosensibles y del canal auxiliar de temperatura, observándose una operación sin recorte ni saturación eléctrica en la etapa analógica dentro de las condiciones evaluadas. Asimismo, se comprobó la correcta ejecución del algoritmo estructurado en el firmware para el cálculo de las señales normalizadas $S_x$ y $S_y$, la estimación de las componentes angulares mediante tablas de interpolación, la reconstrucción del vector solar unitario y la comunicación mediante UART. El análisis del modelo geométrico ideal definitivo permitió predecir analíticamente un límite teórico simétrico de ±15.583° para ambos ejes, correspondiente a un intervalo total de 31.165°. La evaluación estadística del error de reconstrucción se realizó en los intervalos de $-\ 8°$ a $+\ 8°$ para el eje $x_S$ y de $-\ 5°$ a $+\ 5°$ para el eje $y_S$, utilizando el mismo conjunto de datos empleado para construir las tablas de búsqueda.

El primer objetivo específico estuvo orientado al análisis de los fundamentos, configuraciones y desarrollos previos de sensores de Sol para establecer los criterios de diseño aplicables al instrumento. La revisión realizada permitió ubicar la función del sensor dentro de un sistema de determinación de orientación, analizar diferentes principios de medición y establecer las características requeridas para la arquitectura desarrollada posteriormente. Estos elementos proporcionaron la base conceptual empleada para definir la configuración del arreglo fotosensible y las etapas de procesamiento utilizadas en el prototipo.

El segundo objetivo específico consistió en desarrollar un modelo matemático y geométrico que relacionara la respuesta de los elementos fotosensibles con los ángulos de incidencia, incorporando las señales normalizadas y la predicción del intervalo angular asociado con la geometría del instrumento. El modelo permitió establecer la secuencia entre el ángulo incidente, el desplazamiento de la proyección de la apertura de la estructura mecánica, las áreas iluminadas y la respuesta diferencial de los detectores. Los resultados de la caracterización mostraron una concordancia tendencial con la formulación analítica. Se observó un comportamiento opuesto entre los detectores de cada par, así como la predominancia de un par específico según el eje evaluado y una alta sensibilidad en la zona central. Además, en las regiones extremas, las señales normalizadas tendieron a mantenerse constantes al aproximarse al límite geométrico extremo previsto por el modelo.

El tercer objetivo específico comprendió el diseño e implementación de la arquitectura electrónica, mecánica y de procesamiento del sensor. A partir del modelo se seleccionaron los componentes y se desarrolló la tarjeta de circuito impreso, la estructura mecánica y el procesamiento ejecutado por el microcontrolador. La implementación final integró los cuatro elementos fotosensibles, la etapa de acondicionamiento y adquisición, junto con el procesamiento necesario para convertir las señales normalizadas en estimaciones angulares y reconstruir la dirección solar local. Las funciones previstas fueron validadas mediante las pruebas experimentales.

El cuarto objetivo específico estableció la caracterización experimental del prototipo mediante un banco de pruebas en tierra, con el propósito de caracterizar la respuesta angular experimental y cuantificar los datos respecto a la referencia utilizada. Los barridos realizados permitieron construir las curvas de calibración y establecer empíricamente la relación entre las variables normalizadas y los ángulos. Restringiendo la evaluación estadística a la zona interna de los límites del intervalo de respuesta observados, se calcularon las métricas de desempeño para cada eje. Dado que estos valores se obtuvieron mediante la interpolación de los mismos barridos empleados para construir las tablas de búsqueda (LUT), la evaluación permite caracterizar el error de reconstrucción asociado al modelo de calibración y verificar la viabilidad de la estrategia implementada en el firmware.

El quinto objetivo específico consistió en comparar los resultados experimentales con el modelo teórico, con el propósito de evaluar el comportamiento del instrumento, analizar las diferencias observadas y delimitar el alcance de la validación realizada. La comparación demostró una clara concordancia de tendencia entre el comportamiento físico y la abstracción matemática. Las discrepancias numéricas observadas son atribuibles de manera conjunta al carácter estrictamente ideal del modelo geométrico y a las no idealidades presentes en las pruebas, sin que se pueda asignar una causa única. A partir de la comparación se reconocieron como posibles factores influyentes la calidad de la referencia angular proporcionada por el MPU6050, la alineación manual del sistema, la alineación temporal de registros provenientes de interfaces seriales independientes y las condiciones particulares de la fuente de iluminación. No se cuantificó de manera independiente la contribución de cada factor. Asimismo, la validación se limitó a ensayos realizados en condiciones controladas de laboratorio, sin considerar pruebas en cámaras de simulación ambiental extrema.

En conjunto, el trabajo permitió completar la secuencia de modelado, diseño, fabricación, integración, calibración y caracterización experimental, obteniéndose un prototipo funcional validado en tierra.

## 6.2 Contribuciones y limitaciones del trabajo

### 6.2.1 Contribuciones

La principal contribución de este trabajo corresponde al desarrollo integral de un sensor de Sol, desde la formulación geométrica del modelo teórico hasta la implementación y validación experimental de un prototipo físico. El desarrollo integró en una misma arquitectura el principio de medición óptica, la etapa de acondicionamiento analógico, la integración de los elementos fotosensibles en una estructura mecánica compatible con las restricciones de un CubeSat 3U, el procesamiento embebido mediante interpolación y un procedimiento experimental de calibración.

La formulación paramétrica del modelo permitió establecer una relación matemática entre la dirección de incidencia y la respuesta diferencial de los elementos fotosensibles. A partir de la proyección geométrica de la apertura sobre el arreglo de detectores, fue posible interpretar la variación de las señales y determinar el comportamiento esperado del sensor dentro del intervalo geométrico ideal previsto por el modelo. La comparación entre las predicciones del modelo y los resultados experimentales permitió verificar que las tendencias observadas en las mediciones son consistentes con el comportamiento previsto por la formulación geométrica, proporcionando una base para la interpretación y calibración de la respuesta angular del dispositivo.

La incorporación del procesamiento de la información directamente en el microcontrolador MSPM0C1104 y las relaciones experimentales obtenidas durante la calibración fueron implementadas mediante tablas de interpolación, permitiendo transformar de manera autónoma las señales adquiridas en estimaciones de los ángulos de incidencia y reconstruir el vector solar unitario. De esta manera, el prototipo puede realizar localmente el procesamiento necesario para obtener las variables de interés y transmitir los resultados mediante la interfaz de comunicación, sin requerir un procesamiento externo para la evaluación de las relaciones de calibración.

Una contribución adicional corresponde a la integración y miniaturización de los diferentes subsistemas en un único circuito impreso. La incorporación de la etapa de acondicionamiento analógico, los canales de adquisición y los cuatro elementos fotosensibles dentro de una arquitectura compacta permitió reducir el volumen ocupado por el sistema y mantener sus componentes dentro de las restricciones físicas consideradas para su integración en una plataforma CubeSat 3U. Esta integración demuestra la viabilidad de implementar en un volumen reducido las funciones necesarias para la adquisición y procesamiento de la información proveniente del sensor.

Finalmente, la implementación física permitió evaluar el funcionamiento del sistema como un conjunto, en lugar de limitar la caracterización a los elementos fotosensibles de manera individual. La adquisición de los cuatro canales, el acondicionamiento de las señales, el procesamiento embebido, la reconstrucción de la dirección solar y la

comunicación de los resultados fueron evaluados simultáneamente. Los resultados obtenidos proporcionan una base experimental para continuar con el futuro refinamiento y maduración del instrumento, particularmente mediante la ampliación de las condiciones de prueba y la incorporación de procedimientos de validación bajo condiciones ambientales representativas de una misión espacial.

### 6.2.2 Limitaciones

Los resultados de validación obtenidos se encuentran condicionados por las características y limitaciones del banco experimental utilizado. La referencia de pitch y roll proporcionada por el MPU6050 no fue sometida a una caracterización metrológica externa ni a una calibración trazable a patrones de laboratorio. Por ello, los errores angulares calculados representan diferencias respecto a la referencia inercial utilizada y no constituyen una determinación absoluta de la exactitud direccional del sensor.

La alineación temporal de los datos entre el sensor y la referencia se realizó mediante la asociación de las estampas de tiempo y ángulos correspondientes a dos interfaces seriales independientes. Este procedimiento permitió relacionar las mediciones obtenidas durante las pruebas realizadas por escalones angulares, sin embargo, no corresponde a un esquema de sincronización determinista. Asimismo, las variaciones asociadas con la alineación manual del soporte durante los ensayos constituyen una fuente adicional de incertidumbre que no fue separada cuantitativamente del error propio de la reconstrucción angular.

En cuanto a la iluminación, la caracterización experimental se realizó utilizando una lámpara halógena General Electric modelo CYX de 2000 W, ubicada a una distancia de 80 cm del sensor. Aunque las condiciones de irradiancia empleadas permitieron realizar la caracterización bajo un nivel de iluminación controlado, la distribución espectral de esta fuente no reproduce de manera exacta el espectro de la radiación solar bajo condiciones AM0. Por tanto, las diferencias espectrales entre ambas fuentes constituyen una limitación para extrapolar directamente los resultados obtenidos a las condiciones de iluminación presentes en el entorno espacial.

Finalmente, el prototipo funcional no fue sometido a ensayos ambientales representativos de una misión espacial. En particular, no se realizaron pruebas en vacío térmico, vibración, choque mecánico ni exposición a radiación ionizante. En consecuencia, los resultados presentados corresponden a una validación funcional y experimental realizada en condiciones controladas de laboratorio, por lo que aún es necesario evaluar la respuesta del instrumento frente a las condiciones ambientales propias de su eventual aplicación espacial.

Estas limitaciones no impiden evaluar el principio de funcionamiento ni la integración del sistema, pero establecen el alcance dentro del cual deben interpretarse los resultados obtenidos.

## 6.3 Trabajo futuro

La continuación de este desarrollo deberá orientarse hacia el fortalecimiento de la caracterización cuantitativa del prototipo, la mejora de las condiciones metrológicas del banco experimental, la evaluación de la repetibilidad y la ampliación progresiva de las condiciones de prueba, con el propósito de avanzar hacia etapas posteriores de maduración tecnológica.

Como primera línea de acción, será fundamental la evaluación de la repetibilidad de la medición. Para ello, será conveniente utilizar conjuntos de datos independientes de aquellos empleados para construir las tablas de calibración (LUT), así como realizar barridos adicionales con reposicionamiento del sistema y bajo distintas condiciones temporales. Esta metodología permitirá evaluar si las relaciones obtenidas durante la calibración se mantienen ante nuevas mediciones y distinguir entre las contribuciones asociadas al procedimiento de calibración, al modelo de interpolación y a las variaciones propias del banco experimental.

Desde el punto de vista metrológico, será conveniente sustituir la referencia inercial empleada por un sistema de posicionamiento angular con resolución y trazabilidad conocidas, como una mesa rotativa motorizada equipada con encoders calibrados. De igual forma, un sistema de adquisición con sincronización común para el prototipo y la referencia permitiría reducir las asociaciones incorrectas de registros y los desajustes temporales vinculados con la alineación y el registro temporal de las mediciones. Estas mejoras pueden proporcionar una referencia angular de mayor calidad y permitirán establecer un presupuesto de incertidumbre más completo para el instrumento.

También será necesario caracterizar con mayor detalle las condiciones de iluminación utilizadas durante las pruebas. La medición y documentación de parámetros como la irradiancia, la distribución espectral, la distancia y la geometría de la fuente permitirían estudiar de manera más controlada la influencia de la iluminación sobre la respuesta de los detectores. En particular, sería conveniente complementar las observaciones realizadas sobre la continuidad de las variables normalizadas ante variaciones de iluminación con ensayos diseñados específicamente para cuantificar el efecto de la irradiancia y evaluar el alcance de la normalización diferencial.

De igual forma, será conveniente fabricar y caracterizar unidades adicionales del prototipo. La evaluación de diferentes unidades permitirá cuantificar la variabilidad introducida por las tolerancias de manufactura, el montaje de los elementos fotosensibles, la soldadura, las dimensiones finales de la PCB y la estructura mecánica, así como las diferencias entre componentes. Esta información será útil para determinar la reproducibilidad del diseño y establecer criterios de fabricación y calibración aplicables a futuras unidades.

Finalmente, una etapa posterior deberá considerar la evaluación del prototipo bajo condiciones ambientales representativas de su posible aplicación espacial. La realización de ensayos térmicos en vacío, vibración y choque mecánico, acompañados de una caracterización eléctrica y angular antes y después de cada prueba, permitiría identificar posibles mecanismos de degradación y determinar las modificaciones necesarias para

continuar la maduración del diseño. De igual forma, la evaluación de la tolerancia a radiación de los componentes deberá considerarse de acuerdo con los requisitos de la misión en la que eventualmente se integre el instrumento.

Con esto, el prototipo desarrollado constituye una base funcional sobre la cual puede continuar el proceso de caracterización, refinamiento y validación del instrumento. El trabajo futuro deberá centrarse en aumentar el rigor metrológico de las pruebas, cuantificar las principales fuentes de incertidumbre y evaluar progresivamente la estabilidad del sistema bajo condiciones más representativas de su aplicación final. Para aplicaciones que requieran una cobertura angular superior a la proporcionada por una sola unidad, podrá estudiarse adicionalmente la distribución de varios sensores en diferentes orientaciones del vehículo.

## Referencias


**[1]** California Polytechnic State University, CubeSat Design Specification (1U-12U), Rev. 14.1, CP-CDS-R14.1, The CubeSat Program, Cal Poly SLO, 2022.

**[2]** P. Fortescue, G. Swinerd y J. Stark, eds., Spacecraft Systems Engineering, 4a ed. John Wiley & Sons, 2011. DOI: 10.1002/9781119971009.

**[3]** J. R. Wertz, ed., Spacecraft Attitude Determination and Control. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1978. DOI: 10.1007/978-94-009-9907-7.

**[4]** F. L. Markley y J. L. Crassidis, Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control. New York: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-1-4939-0802-8.

**[5]** National Aeronautics and Space Administration, State of the Art Small Spacecraft Technology, 2026, cap. 5, Guidance, Navigation, and Control. DOI: 10.64631/BGEJ5109.

**[6]** J. R. Wertz, D. F. Everett y J. J. Puschell, eds., Space Mission Engineering: The New SMAD. Microcosm Press, 2011.

**[7]** C. Cappelletti, S. Battistini y B. K. Malphrus, eds., CubeSat Handbook: From Mission Design to Operations. Academic Press, 2020. DOI: 10.1016/C2018-0-02366-X.

**[8]** M. Buonocore, M. Grassi y G. Rufino, “APS-based miniature sun sensor for Earth observation nanosatellites,” Acta Astronautica, vol. 56, nos. 1-2, pp. 139-145, 2005. DOI: 10.1016/j.actaastro.2004.09.006.

**[9]** A. Antonello, L. Olivieri y A. Francesconi, “Development of a low-cost sun sensor for nanosatellites,” Acta Astronautica, vol. 144, pp. 429-436, 2018. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.01.003.

**[10]** M. A. Post, J. Li y R. Lee, “A Low-Cost Photodiode Sun Sensor for CubeSat and Planetary Microrover,” International Journal of Aerospace Engineering, vol. 2013, art. 549080, 2013. DOI: 10.1155/2013/549080.

**[11]** M. Anger, B. Clayhills, N. Jovanovic, A. Fetzer, P. Niemelä, C. Kauppinen y J. Praks, “Qualification of affordable open-source analog and digital Sun sensors for CubeSats,” Advances in Space Research, vol. 77, no. 6, pp. 7352-7372, 2026. DOI: 10.1016/j.asr.2026.01.083.

**[12]** Solar MEMS Technologies, nanoSSOC-A60: Analog Sun Sensor for Nano-Satellites, ficha técnica.

**[13]** Solar MEMS Technologies, nanoSSOC-D60 Technical Specification, Interfaces & Operation, ver. 1.16, 2021.

**[14]** Tensor Tech, FSS100 & CSS100 Fine and Coarse Sun Sensor, ficha técnica.

**[15]** CubeSpace, CubeSense Sun Gen 2 Product Description, CS-DEV.PD.CS-01, ver. 1.00, 2023.

**[16]** ASTM International, ASTM E490-22, Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, West Conshohocken, PA, USA, 2022. DOI: 10.1520/E0490-22.

**[17]** B. D. Yost et al., State of the Art Small Spacecraft Technology, NASA, Technical Publication 20260003140, 2026. DOI: 10.64631/BGEJ5109.

**[18]** Hamamatsu Photonics K.K., Technical note: Si photodiodes, documento técnico de fabricante, consultado en 2026.

**[19]** European Cooperation for Space Standardization, ECSS-Q-ST-70-01C Rev.1, Cleanliness and contamination control, 15 Oct. 2025.

**[20]** European Cooperation for Space Standardization, ECSS-Q-ST-70-02C, Thermal vacuum outgassing test for the screening of space materials, 15 Nov. 2008.

**[21]** H. W. Ott, Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1988.

**[22]**J. Prado, “Sistema embebido para la determinación y control de orientación de un CubeSat,” tesis de maestría, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2019.

**[23]**J. R. Taylor, An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements, 2nd ed. Sausalito, CA, USA: University Science Books, 1997.

**[24]**National Aeronautics and Space Administration, “Material Total Mass Loss in Vacuum Obtained from Various Outgassing Systems,” NASA Technical Reports Server, 2020.

**[25]**Vishay Semiconductors, “TEMD5010X01 Silicon PIN Photodiode,” hoja de datos, consultada en 2026.

**[26]**Texas Instruments, “INAx180-Q1 Automotive, Low- and High-Side Voltage Output, Current-Sense Amplifiers,” hoja de datos, Rev. D.

**[27]**Texas Instruments, “MSPM0C110x, MSPS003 Mixed-Signal Microcontrollers,” hoja de datos, Rev. D, 2026.

**[28]**Texas Instruments, “TMP23x Low-Power, High-Accuracy Analog Output Temperature Sensors,” hoja de datos, Rev. E.

**[29]**Molex, “2 mm Wire-to-Board Connector System, Series 87831/87832/87833,” Product Specification PS-87831-027-001, Rev. B, 2020.

**[30]**IPC, IPC-2221C, Generic Standard on Printed Board Design, 2023.

**[31]**IPC, IPC-2222B, Sectional Design Standard for Rigid Organic Printed Boards, 2020.

**[32]**IPC, IPC-7352, Generic Guideline for Land Pattern Design, 2023.

**[33]**IPC, IPC-4101E-WAM1, Specification for Base Materials for Rigid and Multilayer Printed Boards.

**[34]**R. F. Muraca and J. S. Whittick, Materials Data Handbook: Aluminum Alloy 6061, 2nd ed., NASA CR-123772, May 1972.

# Anexos

## Anexo A. Diagrama Eléctrico del sensor

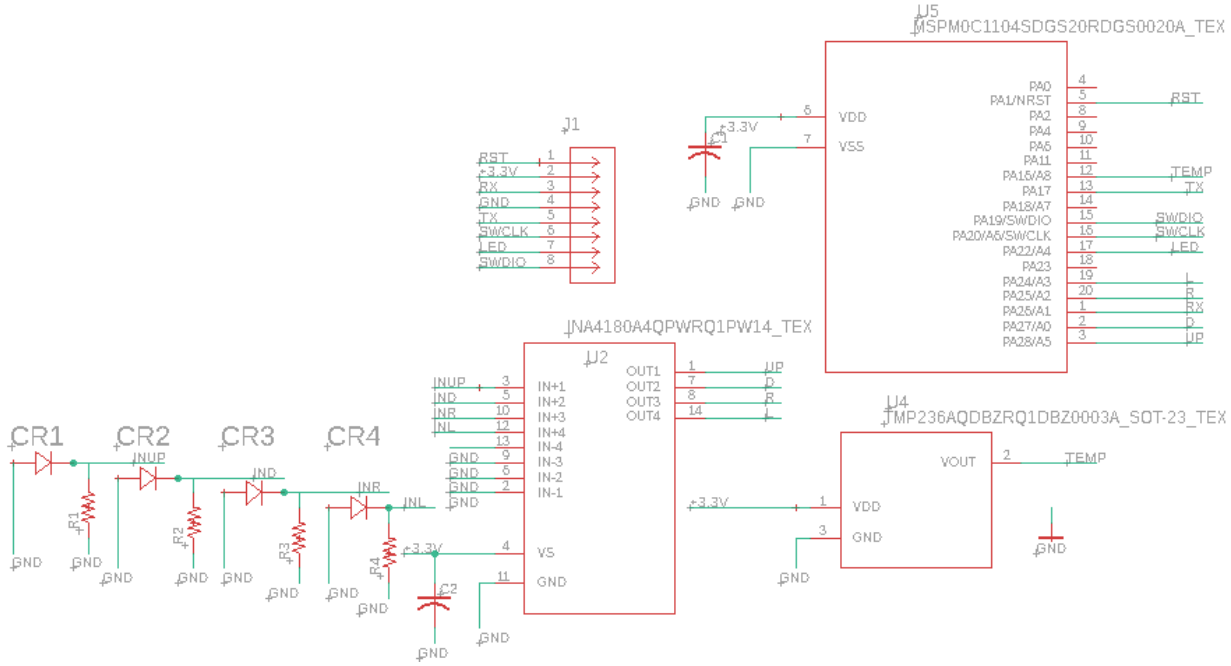



*Figura A.1. Diagrama eléctrico del prototipo utilizado para integrar los cuatro fotodiodos, el amplificador INA4180A4, el MSPM0C1104, el TMP236 y el conector de interfaz.*

## Anexo B. Planos de la estructura mecánica de aluminio

*Nota. Los planos presentados provienen directamente de los archivos de fabricación originales. Aunque en el cuerpo de la tesis se utiliza la denominación "estructura mecánica", los rótulos internos de los planos conservan la nomenclatura original empleada durante su manufactura..*

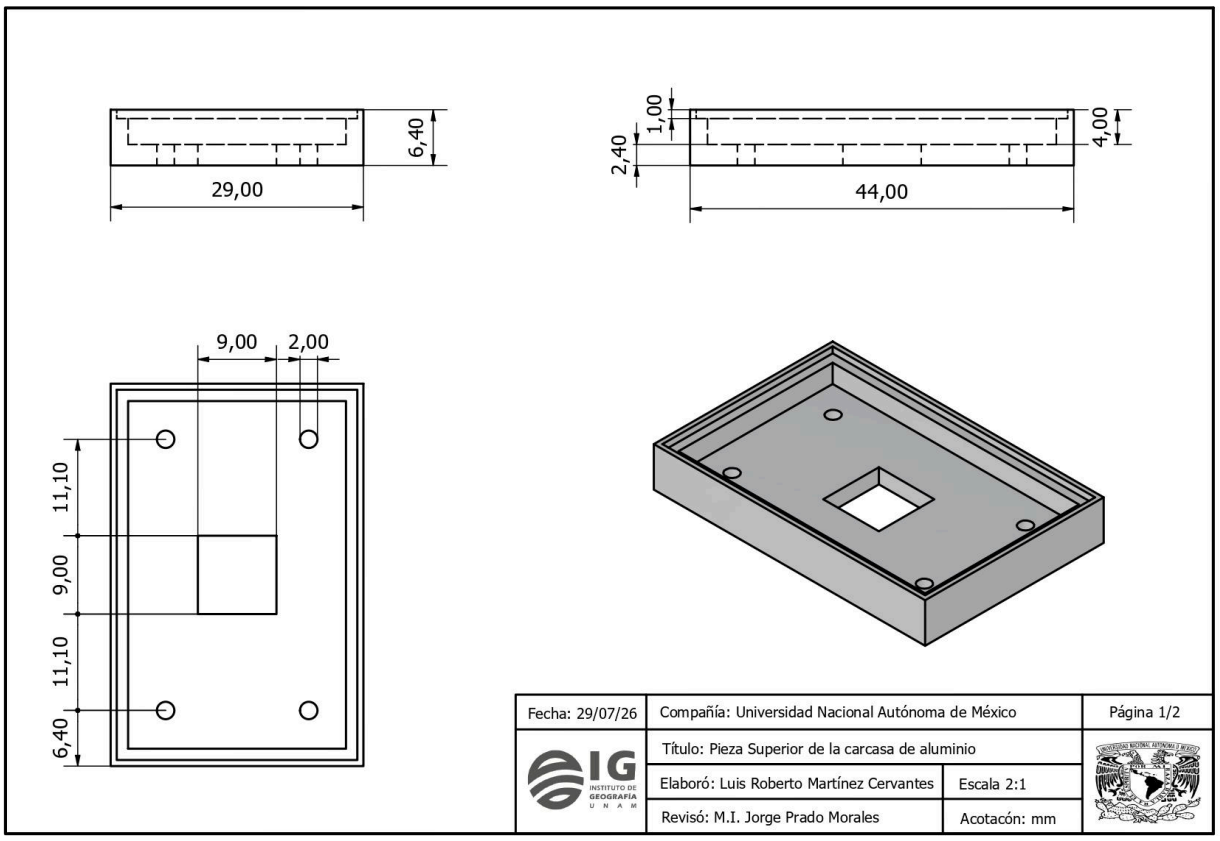



**Figura B.1.** Plano de fabricación de la pieza superior de la estructura mecánica.

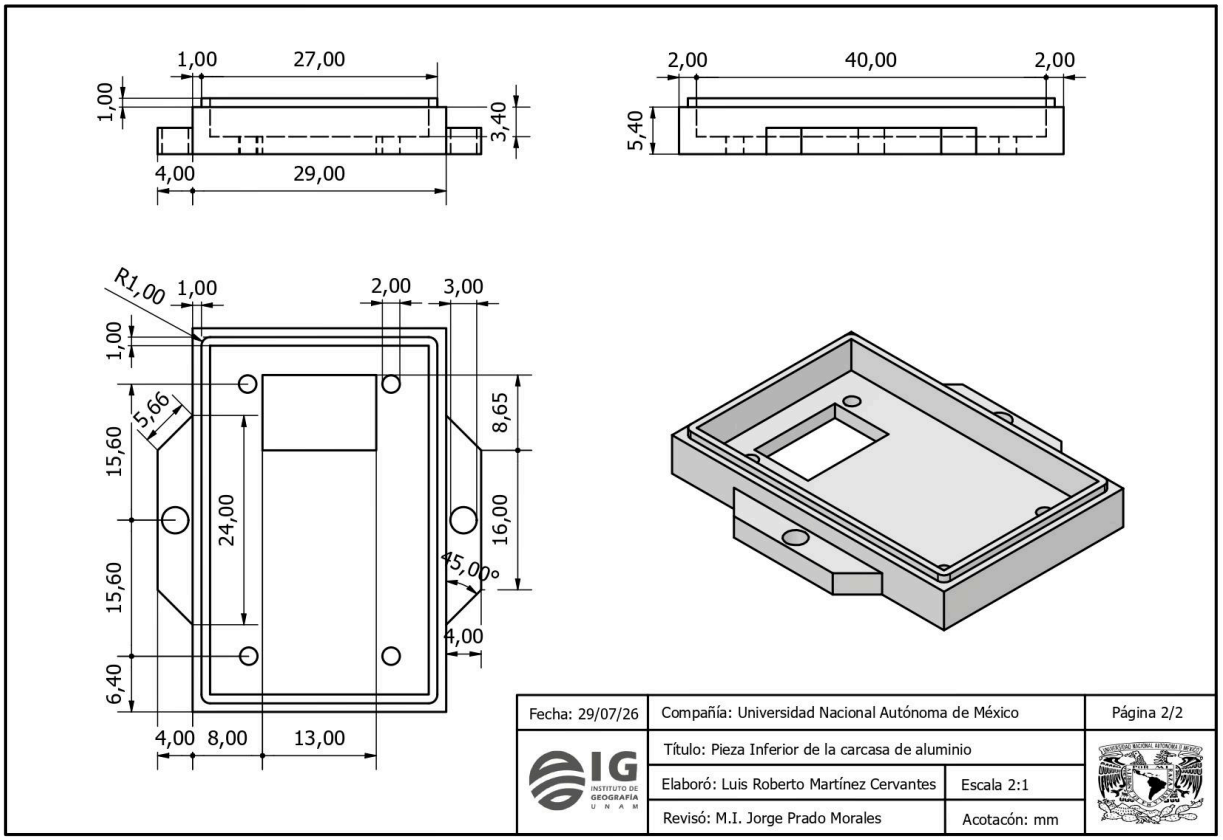



**Figura B.2**. Plano de fabricación de la pieza inferior de la estructura mecánica.

## Anexo C. Código de adquisición utilizado durante la caracterización

*Nota. El código presentado corresponde a la versión de adquisición utilizada. Esta versión incluye las actualizaciones correspondientes para integrar la lectura del sensor de temperatura TMP236 documentado en el diseño, conservando la estructura principal orientada a la adquisición y transmisión en formato CSV.*

```
#include "ti_msp_dl_config.h"
#include <stdint.h>
#include <stdbool.h>


#define ADC_MAX_COUNTS   4095UL
#define VREF_MV          3300UL


#define TEMP_CAL_MV_AT_AMBIENT   180L
#define TEMP_CAL_AMBIENT_X10     210L

/*
    Mapeo de canales:


    ADC1 -> PA27 -> Channel 0
    ADC2 -> PA28 -> Channel 5
    ADC3 -> PA24 -> Channel 3
    ADC4 -> PA25 -> Channel 2
    TMP36 -> PA16 -> Channel 8
*/


void UART_sendChar(char c)
{
    DL_UART_Main_transmitDataBlocking(UART_0_INST, c);
}


void UART_sendString(const char *str)
{
    while (*str != '\0')
    {
        UART_sendChar(*str++);
    }
}


void UART_sendUInt(uint32_t value)
{
    char buffer[10];
    int i = 0;


    if (value == 0)
    {
        UART_sendChar('0');
        return;
    }


    while (value > 0)
    {
```

```
        buffer[i++] = '0' + (value % 10);
        value /= 10;
    }


    while (i > 0)
    {
        UART_sendChar(buffer[--i]);
    }
}


void UART_sendInt(int32_t value)
{
    if (value < 0)
    {
        UART_sendChar('-');
        value = -value;
    }


    UART_sendUInt((uint32_t)value);
}


/*
    Imprime temperatura con un decimal.


    temp_x10 representa temperatura * 10.


    Ejemplo:
    253 -> 25.3 °C
    -42 -> -4.2 °C
*/
void UART_sendTemperature_x10(int32_t temp_x10)
{
    if (temp_x10 < 0)
    {
        UART_sendChar('-');
        temp_x10 = -temp_x10;
    }


    UART_sendUInt((uint32_t)(temp_x10 / 10));
    UART_sendChar('.');
    UART_sendChar('0' + (temp_x10 % 10));
}

uint16_t ADC_readSingleChannel(uint32_t channel)
{
    uint16_t result;

    DL_ADC12_configConversionMem(
        ADC12_0_INST,
        DL_ADC12_MEM_IDX_0,
        channel,
        DL_ADC12_REFERENCE_VOLTAGE_VDDA,
        DL_ADC12_SAMPLE_TIMER_SOURCE_SCOMP0,
        DL_ADC12_AVERAGING_MODE_DISABLED,
```

```
        DL_ADC12_BURN_OUT_SOURCE_DISABLED,
        DL_ADC12_TRIGGER_MODE_AUTO_NEXT,
        DL_ADC12_WINDOWS_COMP_MODE_DISABLED
    );


    /*
     * Limpiar bandera previa de resultado en MEM0.
     */
    DL_ADC12_clearInterruptStatus(
        ADC12_0_INST,
        DL_ADC12_INTERRUPT_MEM0_RESULT_LOADED
    );


    /*
     * Habilitar conversiones e iniciar una conversión.
     */
    DL_ADC12_enableConversions(ADC12_0_INST);
    DL_ADC12_startConversion(ADC12_0_INST);


    /*
     * Esperar hasta que MEM0 tenga resultado.
     */
    while (DL_ADC12_getRawInterruptStatus(
               ADC12_0_INST,
               DL_ADC12_INTERRUPT_MEM0_RESULT_LOADED) == 0)
    {
        /* Espera activa */
    }


    /*
     * Limpiar bandera después de leer.
     */
    DL_ADC12_clearInterruptStatus(
        ADC12_0_INST,
        DL_ADC12_INTERRUPT_MEM0_RESULT_LOADED
    );


    /*
     * Leer resultado de MEM0.
     */
    result = DL_ADC12_getMemResult(
        ADC12_0_INST,
        DL_ADC12_MEM_IDX_0
    );


    return result;
}

int main(void)
{
    uint16_t adc1_pa27;
    uint16_t adc2_pa28;
    uint16_t adc3_pa24;
    uint16_t adc4_pa25;
    uint16_t adc5_pa16_tmp36;
```

```
    uint32_t v1_mV;
    uint32_t v2_mV;
    uint32_t v3_mV;
    uint32_t v4_mV;
    uint32_t v5_mV;


    int32_t temperatura_x10;


    uint32_t sample = 0;


    SYSCFG_DL_init();


    /*
        Formato de salida CSV.


        Python leerá líneas como:



sample,adc1_counts,adc1_mV,adc2_counts,adc2_mV,adc3_counts,adc3_mV,adc4_count
s,adc4_mV,tmp_counts,tmp_mV,temp_C


    UART_sendString("\r\n");

UART_sendString("sample,adc1_counts,adc1_mV,adc2_counts,adc2_mV,adc3_counts,a
dc3_mV,adc4_counts,adc4_mV,tmp_counts,tmp_mV,temp_C\r\n");


    while (1)
    {
        /*
         * Leer cada canal usando solamente MEM0.
         */
         adc1_pa27        = ADC_readSingleChannel(DL_ADC12_INPUT_CHAN_0);  //
PA27
         adc2_pa28        = ADC_readSingleChannel(DL_ADC12_INPUT_CHAN_5);  //
PA28
         adc3_pa24        = ADC_readSingleChannel(DL_ADC12_INPUT_CHAN_3);  //
PA24
         adc4_pa25        = ADC_readSingleChannel(DL_ADC12_INPUT_CHAN_2);  //
PA25
          adc5_pa16_tmp36 = ADC_readSingleChannel(DL_ADC12_INPUT_CHAN_8);  //
PA16 TMP36


        /*
         * Convertir ADC a milivolts.
         */
        v1_mV = ((uint32_t)adc1_pa27       * VREF_MV) / ADC_MAX_COUNTS;
        v2_mV = ((uint32_t)adc2_pa28       * VREF_MV) / ADC_MAX_COUNTS;
        v3_mV = ((uint32_t)adc3_pa24       * VREF_MV) / ADC_MAX_COUNTS;
        v4_mV = ((uint32_t)adc4_pa25       * VREF_MV) / ADC_MAX_COUNTS;
        v5_mV = ((uint32_t)adc5_pa16_tmp36 * VREF_MV) / ADC_MAX_COUNTS;
```

```
        /*
         * Calibración empírica de temperatura:
         *
         * Se observó que el ADC lee aproximadamente 180 mV
         * cuando la temperatura ambiente es 21.0 °C.
         *
         * temperatura_x10 representa temperatura * 10.
         *
         * 21.0 °C = 210
         */
            temperatura_x10 = ((int32_t)v5_mV - TEMP_CAL_MV_AT_AMBIENT) +
TEMP_CAL_AMBIENT_X10;


        /*
         * Imprimir resultados en formato CSV.
         *
         * Columnas:
         * sample,
         * adc1_counts, adc1_mV,
         * adc2_counts, adc2_mV,
         * adc3_counts, adc3_mV,
         * adc4_counts, adc4_mV,
         * tmp_counts, tmp_mV,
         * temp_C
         */


        UART_sendUInt(sample);
        UART_sendChar(',');


        UART_sendUInt(adc1_pa27);
        UART_sendChar(',');
        UART_sendUInt(v1_mV);
        UART_sendChar(',');


        UART_sendUInt(adc2_pa28);
        UART_sendChar(',');
        UART_sendUInt(v2_mV);
        UART_sendChar(',');


        UART_sendUInt(adc3_pa24);
        UART_sendChar(',');
        UART_sendUInt(v3_mV);
        UART_sendChar(',');


        UART_sendUInt(adc4_pa25);
        UART_sendChar(',');
        UART_sendUInt(v4_mV);
        UART_sendChar(',');


        UART_sendUInt(adc5_pa16_tmp36);
        UART_sendChar(',');
        UART_sendUInt(v5_mV);
```

```
        UART_sendChar(',');

        UART_sendTemperature_x10(temperatura_x10);

        UART_sendString("\r\n");

        sample++;

        delay_cycles(12000000);
    }
}
```