



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

SENSOR DE SOL BASADO EN
ARREGLOS LINEALES DE
FOTODIODOS PARA DETERMINAR LA
ORIENTACIÓN DE UN SATÉLITE.

T É S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO
P R E S E N T A :

EDGAR NÁPOLES CEJA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JORGE PRADO MOLINA



CIUDAD UNIVERSITARIA

MAYO 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RECONOCIMIENTOS.

- ✓ A nuestra Máxima Casa de Estudios, mi querida Universidad Nacional Autónoma de México.
- ✓ A la Facultad de Ingeniería por haberme permitido llegar a ser un profesionalista.
- ✓ Al Instituto de Geografía por abrirme las puertas y permitirme la realización de este proyecto.
- ✓ Al Dr. Jorge Prado por apoyarme en todo este proceso, gracias por ayudarme a dar el último paso.

ÍNDICE

DEDICATORIAS	i
RECONOCIMIENTOS	ii
ÍNDICE	iii
RESUMEN	v

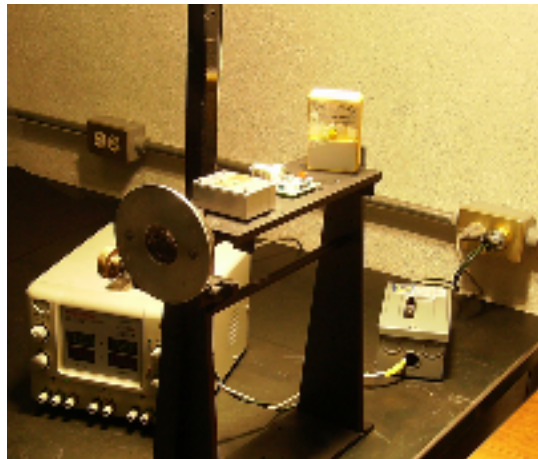
	Página
1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Satélites experimentales.	2
1.2. Detección de orientación.	3
1.2.1. Sensores de orientación.	4
1.3. Sensores de Sol.	6
1.3.1. Sensores de Sol para orientación de satélites.	7
1.3.2. Diferentes tipos de sensores solares.	8
1.3.2.1. Sensores analógicos con celdas fotovoltaicas.	8
1.3.2.2. Sensores analógicos con arreglos lineales de fotodiodos.	11
1.3.2.3. Sensores digitales.	13
1.3.2.3.1. Sensores con arreglos CCD.	14
1.3.2.3.2. Sensores con arreglos CMOS.	14
1.4. El medio ambiente espacial.	16
1.5. Filtrado de señales.	18
2. DETECTORES DE POSICIÓN SOLAR.	20
2.1. Posibles detectores (CCD, CMOS y fotodiodos).	21
2.2. Sensores CCD.	23
2.3. Circuitos CMOS.	26
2.3.1. Comparación entre los sensores de imagen CCD y CMOS.	26
2.4. Fotodiodos.	27
2.4.1. Fotodiodos Schottky planares.	32
2.1.2. Diodos PIN.	33
2.5. Arreglo lineal de fotodiodos	33
3. SENSOR SOLAR EN DOS EJES.	34
3.1. Sensor solar con un arreglo lineal de fotodiodos.	34
3.1.1. Principio de funcionamiento del sensor solar	34
3.1.2. Características electrónicas del arreglo de fotodiodos	38
3.1.3. Circuito de acondicionamiento de señales	40
3.2. Diseño del circuito impreso.	43
3.2.1. Lista de componentes electrónicos	45
3.3. Diseño mecánico del sensor.	45
3.3.1. Determinación de las dimensiones definitivas.	46
3.4. Pruebas de funcionamiento	47

4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE SOL.	49
4.1. Curvas de respuesta.	49
4.2. Calibración y compensación.	53
4.2.1. Arreglo experimental.	54
4.2.1.1. Fuente de iluminación	55
4.2.1.2. Sistema mecánico de inclinación.	56
4.2.1.3. Medidor de intensidad solar.	56
4.2.1.4. Brújula electrónica	57
4.2.1.5. Filtro óptico para atenuación de la radiación solar.	58
4.2.2. Curvas de respuesta.	58
4.3. Sensores burdos de Sol y los albedos Terrestre y Lunar	59
4.3.1. Sensores burdos de Sol.	59
4.3.2. Albedos terrestre y lunar.	60
4.4. Ubicación de los sensores de Sol en el satélite.	60
5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.	62
5.1. Pruebas finales de funcionamiento en Tierra	62
5.2. Conclusiones	64
REFERENCIAS	65

RESUMEN.

Se presenta el diseño, la construcción y las pruebas de funcionamiento realizadas a un sensor de Sol, que será utilizado para detectar la orientación de un satélite pequeño en órbita baja. Su diseño está basado en la utilización de arreglos lineales de fotodiodos de 256 elementos, que permiten obtener información en dos ejes independientes. La salida analógica es acondicionada y filtrada para ser enviada posteriormente a la computadora de a bordo, donde es ejecutado un algoritmo para determinar la desviación de cada eje, con respecto a los ejes fijos al cuerpo de la nave.

El objetivo es desarrollar un sensor de Sol insensible a cambios de temperatura y a la degradación en la respuesta de las celdas fotovoltaicas.



Aparato de inclinación para pruebas de respuesta del sensor.

Se han llevado a cabo diferentes pruebas de funcionamiento, obteniéndose una resolución de 0.1 grados con una cobertura o campo de vista de $\pm 22.5^\circ$. También se ha efectuado una calibración inicial utilizando una fuente de iluminación con potencia similar a la encontrada en órbita terrestre (1250 w/m^2), para determinar los niveles de ganancia adecuados para el sensor. Se ha colocado un filtro óptico que permite atenuar la intensidad del sol para evitar problemas de saturación en los fotodiodos y en consecuencia, en la electrónica de acondicionamiento.

Se presentan los diseños electrónico y mecánico, así como las curvas de calibración y funcionamiento.

INTRODUCCIÓN

Los nano y pico satélites, comúnmente llamados satélites pequeños, representan una importante herramienta para explorar y examinar nuevas ideas, conceptos y dispositivos para misiones espaciales, sin gastar grandes cantidades de dinero; no obstante, las actividades espaciales son extremadamente demandantes no sólo en términos de tecnología y costos, sino también en organización y mantenimiento.

Un pico satélite tiene en promedio un volumen similar al de un cubo de 10cm por lado y tiene una masa de menos de 1kg, por lo que su costo de construcción y puesta en órbita, resulta de unas pocas decenas de miles de dólares. Esto es de 100 a 200 veces más económico que el de un satélite de comunicaciones convencional, además puede realizar tareas tan específicas como las de un satélite de tamaño medio.

El primer papel de los satélites comerciales de comunicaciones es principalmente en usos como la televisión, la telefonía, el envío y recepción de datos, etc. (Domínguez 1998).

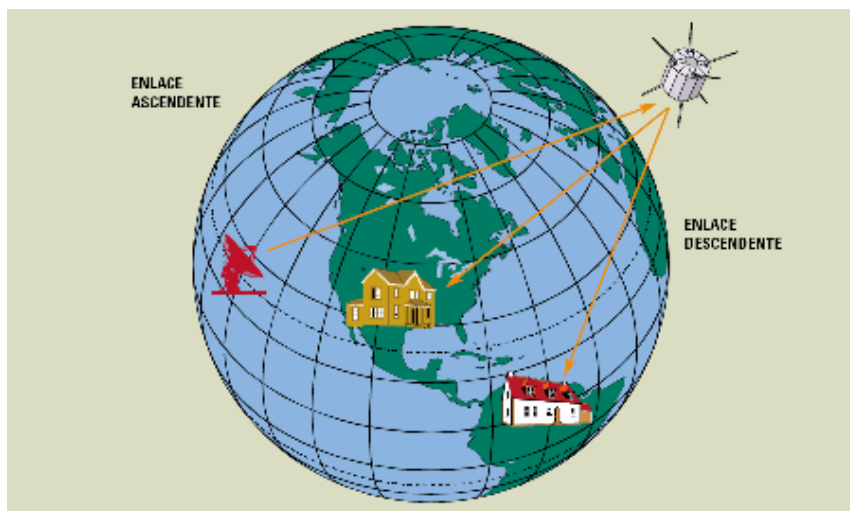


Figura 1.1. Comunicación vía satélite.

El diseño de un artefacto espacial es una tarea multidisciplinaria muy compleja, donde están involucrados diferentes subsistemas. Uno de los más importantes es aquel que efectúa la determinación de su orientación, así como su control de estabilización. Esto va ligado al estudio de su órbita y la dinámica general de cuerpo rígido del vehículo involucrado.

1.1. Satélites experimentales.

Los nano y pico satélites, han sido por tradición desarrollados principalmente por algunas universidades y centros de investigación en distintos países, tienen como principales características su masa reducida, bajo costo de construcción y de lanzamiento, además de ser generalmente de tipo experimental. Estos satélites constituyen una oportunidad de desarrollo de equipo espacial a bajo costo, y presentan una serie de ventajas muy interesantes, ya que es posible llevar a cabo en ellos experimentos en el campo de las comunicaciones, la astronomía, la física y la percepción remota, entre otras.

La puesta en órbita de un equipo espacial, constituye en sí misma una oportunidad muy importante para la realización de experimentos. La diversidad y complejidad de éstos se ve aumentada al contar con un sistema que permita mantener la orientación de la nave de manera continua hacia la Tierra, algún otro planeta o astro del sistema solar o hacia el espacio. La inclusión de un sistema de orientación como parte integral del mismo, permite ampliar de manera significativa la cantidad de experimentos que es posible llevar a cabo en órbita terrestre abordo de estas naves.

Los principales beneficios vislumbrados en los orígenes de la era satelital era la posibilidad de establecer enlaces punto a punto, punto a multipunto, una buena relación señal/ruido sin importar la distancia que viajan las señales y la capacidad de cubrir todas las zonas geográficas. Estos beneficios permanecen actualmente (Domínguez 1998).

En las nuevas generaciones de satélites, éstos no serán cada vez más grandes y masivos, sino que la tendencia es de darles mayor capacidad abordo, de conmutación de transpondedores, de procesamiento de la señal recibida y conexiones punto a punto con otros satélites; llegando a constituir una auténtica central de conmutación en el espacio. Este concepto se ilustra en la [figura 1.2](#).

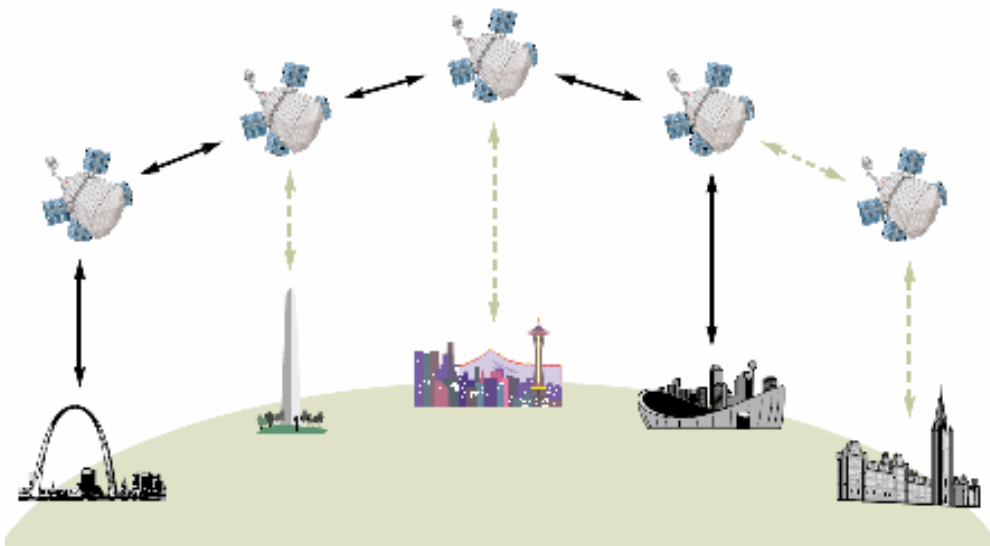


Figura 1.2. Establecimiento de una comunicación utilizando enlaces inter-satélites.

El desarrollo de satélites cada vez mejores, más pequeños y baratos, es la tendencia actual, por lo que los micro y nanosatélites tendrán cada vez más auge en los próximos años (Prado 2007). Se han clasificado en un sentido amplio, como grandes, pequeños, micro, nano y pico satélites. Lo más común es utilizar su masa como un discriminador. En la tabla 1.1 se muestra una clasificación propuesta por la Universidad de Surrey del Reino Unido (Surrey Satellite Technology Limited. 2006). Ésta no constituye una norma, sin embargo, va muy de acuerdo con lo que manejan distintos autores.

TABLA 1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SATÉLITES DE ACUERDO CON SU MASA.

Tamaño	Masa
Grandes	> 1000 kg.
Satélites de tamaño medio	500 – 1000 kg.
Mini	100 – 500 kg.
Micro	10 – 100 kg.
Nano	1 –10 kg.
Pico	< 1 kg.

1.2. Detección de orientación.

La operación en órbita de cualquier nave está sujeta a numerosas fuerzas, que si no actúan sobre el centro de la masa de ésta, entonces estarán produciendo pares perturbadores, su compensación o minimización es tarea del sistema de detección de orientación y control de estabilización. Las perturbaciones en una nave espacial se deben a pares producidos con su interacción con el medio ambiente (arrastre aerodinámico, gradiente gravitacional, presión por viento solar, etc.), o debido a pares internos involuntarios (despliegue de antenas, desplazamiento de cubiertas de lentes, etc); y ya que éstos no pueden ser totalmente eliminados, es necesario contar con algún tipo de sistema de control de orientación para contrarrestar sus efectos (Wertz J.R. 1990).

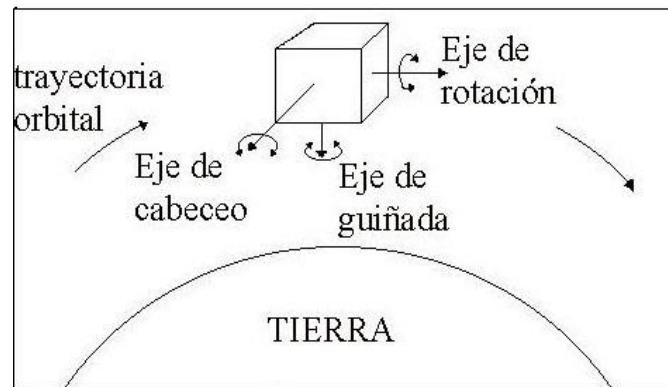


Figura 1.3. Sistema de ejes ortogonales en un satélite.

La orientación de un satélite esta dada por tres ejes ortogonales denominados: rotación, cabeceo y guiñada. La denominación de estos ejes es análoga a la utilizada en aviación y los describimos de la siguiente manera: El eje de rotación, se encuentra localizado de manera axial al vector velocidad, es decir, se encuentra sobre la trayectoria orbital. El eje de guiñada se define como el vector que une el centro de masa de la nave, con el centro de masa de la Tierra. El eje de cabeceo es perpendicular a los dos anteriores para formar un sistema de ejes ortogonales (Miranda V.M. 1998).

Para llevar a cabo el procedimiento de orientación en un satélite, es necesario contar con los datos provenientes de sensores de posición y de velocidad angular y resolver las ecuaciones de cuerpo rígido para obtener una orientación con respecto a un marco de referencia inercial. Esta información sobre la orientación, es enviada a una rutina que se encarga de llevar a cabo las maniobras de estabilización, apuntamiento o reorientación, a través de un conjunto de actuadores. Los sensores de posición pueden ser: de Sol, de Tierra, de estrellas y magnetómetros. Los sensores de velocidad angular son los giróscopos. Los actuadores son, por regla general, bobinas magnéticas, ruedas inerciales y sistemas con toberas de reacción. Es muy aconsejable que las señales de todos los sensores sean filtradas con el propósito de eliminar ruido, debido a las condiciones extremas de temperatura, radiación, alto vacío, etc, donde operan estos dispositivos (Miranda V.M. 1998).

1.2.1. Sensores de orientación.

Dentro de la industria espacial, se han desarrollado algunos sensores de orientación a partir de arreglos de imagen CMOS, entre los que podemos mencionar el de Sol, Tierra y estrellas. Los dos primeros tienen la ventaja de proveer una precisión de menos de un grado, sin embargo, presentan problemas de funcionamiento intermitente y la necesidad de algoritmos complejos. El sensor de estrellas, adicionalmente provee una medida de la velocidad angular de la nave, aunque en la mayoría de los casos limitada a unos cuantos grados sobre segundo. Los problemas que presentan son el ruido térmico de fondo, los tiempos de integración de fotones relativamente largos y la necesidad de un sistema de enfriamiento (Humphreys T. E. 2002).

Los sensores de Sol y Tierra proporcionan la orientación en los ejes de rotación y cabeceo, mientras que los giróscopos entregan velocidades angulares en los tres ejes. Un elemento importante en la orientación es el magnetómetro, ya que en el espacio permite establecer la posición en la que se encuentra la nave dentro de su trayectoria orbital, con un algoritmo de estimación que hace uso de un modelo de campo magnético. (Prado 2007).

El equipamiento para llevar a cabo la detección de la orientación y el control en las naves espaciales, ha sido tradicionalmente muy masivo y costoso, sólo en años recientes han estado disponibles algunos sistemas adecuados para su utilización en microsátélites. Una tendencia muy común llevada a cabo en las primeras misiones de microsátélites, o en aquellas con requisitos de estabilización poco demandantes, es el no usar ningún tipo de estabilización (Prado 2007).

Los sistemas de control activo usan bobinas y/o ruedas inerciales. Rara vez encontraremos toberas como actuadores en este tipo de satélites, a menos de que se

trate de misiones de corta duración; del orden de algunas semanas. El sistema de control más simple y común emplea una extensión telescópica con una masa en su parte final, para generar un gradiente gravitacional, adicionalmente; se puede incluir un conjunto de bobinas magnéticas para amortiguar los movimientos de la nave. La tecnología de ruedas inerciales ha comenzado a ser práctica para satélites pequeños y a ser poco a poco más utilizada. Hasta este momento, solo algunos microsátélites han intentado el control total, haciendo uso de ruedas inerciales en los tres ejes ortogonales (Prado 2007).

El arreglo final de los subsistemas de orientación y control deseable para un satélite de percepción remota, que es donde se colocaría nuestro sensor de Sol, se muestra en la figura 1.4. La necesidad de mantener un apuntamiento continuo y estable hacia la Tierra es de 0.1° en los tres ejes. Es de notarse que con una masa de 6.43 kg y un consumo máximo de 8.40 W, es posible lograr este objetivo (Prado 2007).

En la tabla 1.2 se muestran las características principales de todos los componentes del sistema de detección y control de orientación.

TABLA 1.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE ORIENTACIÓN Y CONTROL.

Componente	No. De piezas	Masa kg	Consumo watts	Precisión	Comentarios
Giróscopos	(3)	0.300	3.00	$0.01^\circ/s$	De estado sólido, 5 años de vida. Deriva $6^\circ/s$
Magnetómetro en tres ejes	(1)	0.150	0.80	1 mgauss	Confiable, de bajo peso y consumo
Sensores de Sol	(3)	0.375	0.90	0.1°	No disponible en eclipse.
Sensores de Tierra	(2)	0.118	0.70	0.1°	Disponible en toda la órbita.
Ruedas inerciales Par: 30 mN-m	(3)	2.790	2.2	0.01°	Muy precisas, 5 años de vida.
Bobinas $12 \text{ A}\cdot\text{m}^2$	(3)	2.700	0.8	3°	Confiables, medianamente Precisas
TOTAL		6.433	8.4		

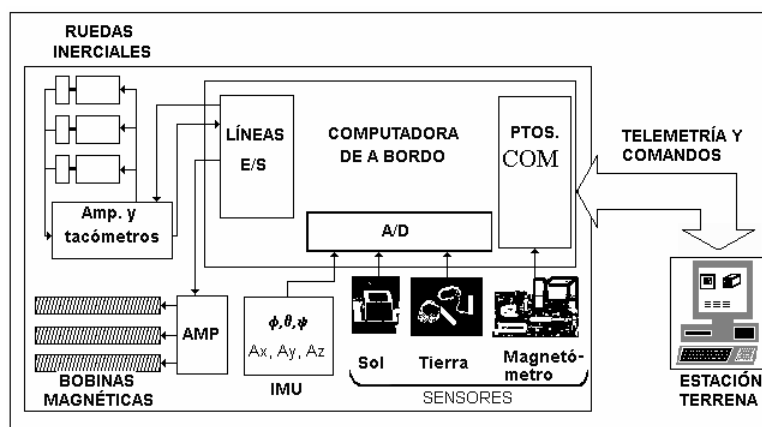


Figura 1.4. Componentes de orientación y control deseables en nuestro satélite de percepción remota.

Los ángulos de apuntamiento que proporcionan los sensores están referidos a los ejes fijos al cuerpo de la nave. Es muy común que las naves espaciales utilicen al Sol y a la Tierra como referencia para determinar su orientación. Cuando un sensor nos entrega un determinado ángulo, en realidad nos está proporcionando una medición que se encuentra dentro de un cono con centro en el Sol y radio igual al ángulo medido. Este cono alrededor del Sol es llamado el cono solar. Utilizando este mismo argumento, la medición del ángulo de nadir implica que el eje vertical está en cualquier lugar de un cono con centro en el propio centro de la Tierra y con un radio igual al ángulo medido por el sensor de nadir terrestre (Prado 2007).

Esto puede verse ilustrado en la figura 1.5, donde la orientación verdadera se encuentra en una de las dos intersecciones de los conos. Como en otros casos similares, para determinar la orientación de manera inequívoca, se debe tomar otra medida independiente, o hacer una estimación a partir de las mediciones anteriores. Cuando el Sol y la Tierra están muy cerca o en el mismo eje, o cuando los conos no se intersectan, no es posible determinar la orientación con este método. En condiciones reales de vuelo orbital, cuando el Sol se encuentra en eclipse, es necesario usar otros sensores como un magnetómetro o un sensor de estrellas, para que en todo momento se cuente con la información de la orientación de la nave (Prado 2007).

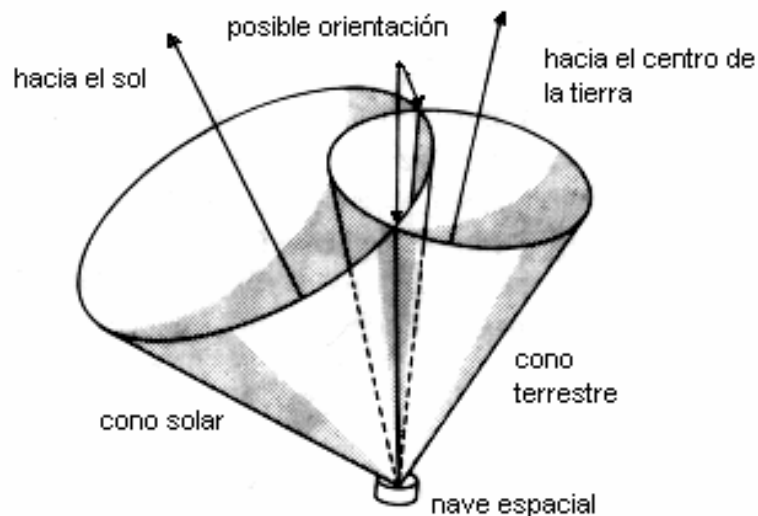


Figura 1.5. Método para determinar la orientación a partir de la intersección de los conos terrestre y solar.

1.3. Sensores de Sol.

Una nave espacial en órbita terrestre tiene que ser capaz de localizar con precisión la posición del Sol, a fin de que sus paneles solares maximicen la producción de energía, pero más aún, un sistema de control de orientación es necesario para que no se pierda

conectividad con las antenas de las estaciones terrestres, o que una cámara apunte constantemente hacia nadir, etc.

Tienen la ventaja de proporcionar dos lecturas de orientación en dos ejes independientes, una buena precisión y un bajo consumo de energía.

Estos dispositivos determinan la posición midiendo la cantidad de luz o sombra que se proyecta sobre ellos.

El sensor solar puede tener distintas configuraciones. En todas sus formas se detecta la desviación, en grados. El intervalo de operación está definido por el campo de visión (la porción visible detectable por el sensor, medible en grados). La selección de un dispositivo en particular debe basarse en el análisis de sus características, ventajas y desventajas (Ruiz D. 2003).

1.3.1. Sensores de Sol para orientación de satélites.

Los sensores de orientación miden los ángulos de los ejes del satélite respecto a referencias externas, o bien, la progresión de la orientación con el tiempo. Su característica principal es que están referidos a un sistema de ejes fijos al cuerpo del satélite y la precisión que entregan depende no solamente de su tecnología o procedimiento usado, sino también del error de alineamiento con respecto a los ejes coordenados del cuerpo del satélite (UPV 2007).

Para obtener la orientación de un satélite con respecto a un sistema de referencia inercialmente fijo, comúnmente el centro de la Tierra, es necesario utilizar una matriz de rotación que transforme coordenadas fijas al cuerpo del satélite, a coordenadas inerciales, ya que éstas son las que nos proporcionan una orientación útil para la mayoría de las aplicaciones.

Los sensores solares analógicos utilizan en algunos casos elementos foto-voltaicos que generan una corriente cuando son iluminados por el Sol. Miden uno o dos ángulos de la luz incidente respecto al plano en que están montados.



Figura 1.6. La cantidad de luz incidente en el sensor solar varía de acuerdo con la posición de éste respecto a la posición del Sol.

1.3.2. Diferentes tipos de sensores solares.

Existen varias formas de detección de la desviación de un satélite con respecto al vector solar. En forma general, existen sensores de Sol analógicos y digitales. Aún cuando en este trabajo nos enfocaremos al desarrollo de un sensor solar de tipo analógico, también se explican las consideraciones básicas para tratar con ambos tipos de sensores.

1.3.2.1. Sensores analógicos con celdas fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas constituyen un tipo de sensor muy interesante, debido a sus características de linealidad. Si una cantidad de radiación constante (luz) incide en su superficie, la respuesta del detector dependerá del ángulo de incidencia; ésta disminuye a medida que se incrementa el ángulo. De forma más precisa, la respuesta varía su amplitud con el coseno del ángulo como se ilustra en la [figura 1.7](#).

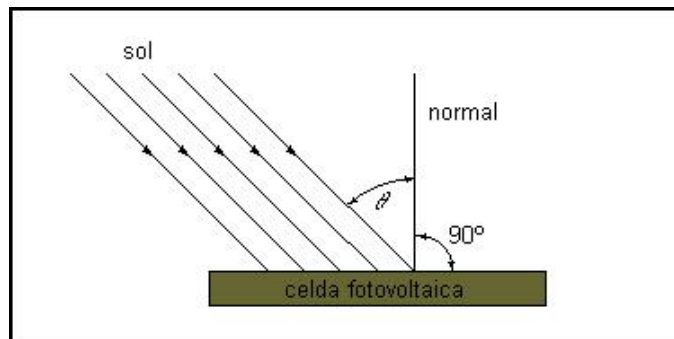


Figura 1.7. Ángulo de incidencia de rayos solares en una celda fotovoltaica.

Puesto que la corriente de salida de la celda fotovoltaica está en función de la energía recibida, en forma de radiación electromagnética, por unidad de área; la corriente de salida del detector es igual a la corriente máxima por el coseno del ángulo de incidencia, esto es:

$$I_s = I_{m\acute{a}x} \cos \theta$$

Los métodos para la detección de la desviación del vector solar están dados por diferentes categorías. Éstos se diferencian por la forma de arreglar los sensores, los hay con detectores internos o externos. Los primeros son los más utilizados porque los elementos detectores se encuentran protegidos contra la radiación directa.

Para tener una mejor idea del funcionamiento de los sensores de Sol externos, analicemos [la figura 1.8](#).

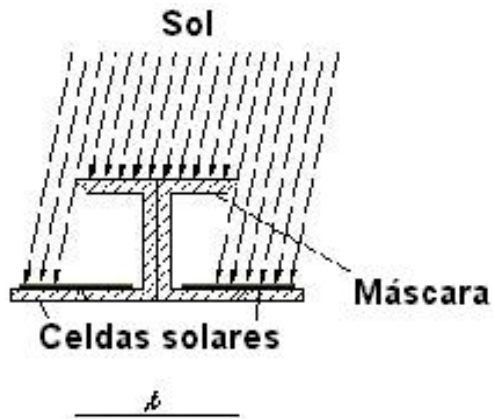


Figura 1.8. Esquema de un sensor de Sol con detectores externos.

Podemos observar que es utilizada una máscara superior que intercepta los rayos solares en una longitud “ l ” igual a la distancia media entre las superficies de las celdas solares. Esto es válido para un eje, pero es posible ampliarlo para dos si se colocan cuatro celdas como por ejemplo, en el arreglo que se muestra en [la figura 1.9](#).

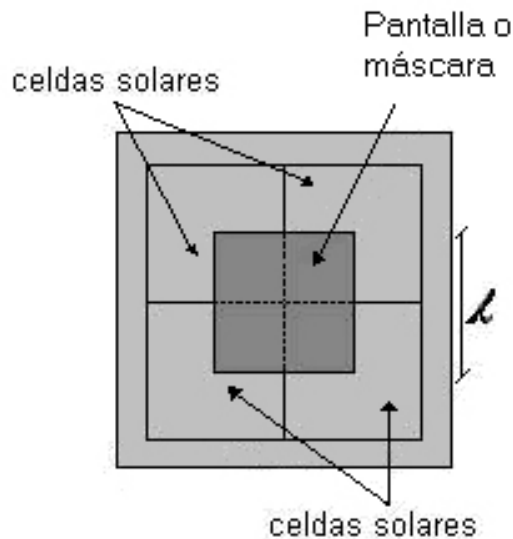


Figura 1.9. Arreglo de cuatro celdas para lograr la detección en dos ejes.

También existe otra forma de arreglar las fotoceldas en forma interna. Se pueden colocar, en forma de cruz o en un arreglo cuadrado. En las [figuras 1.10 y 1.11](#) se muestran estos dos tipos de arreglos.

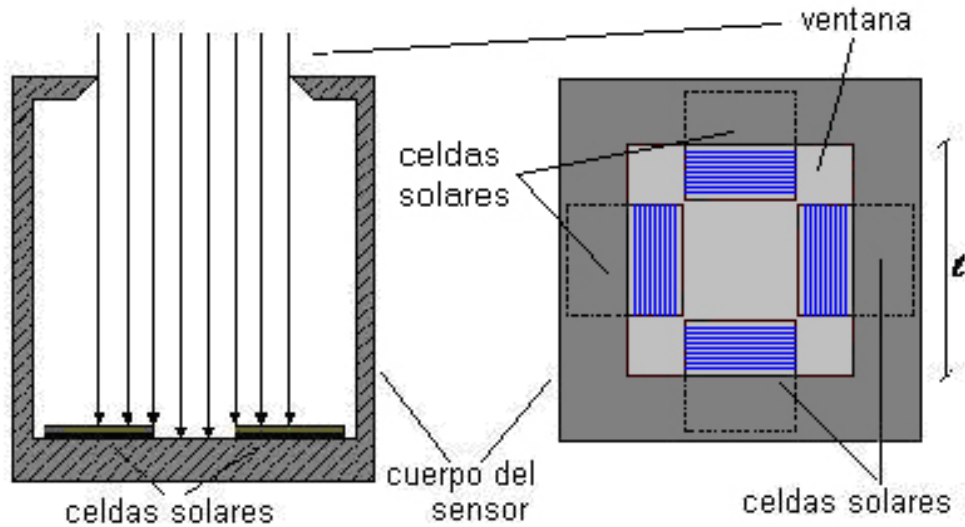


Figura 1.10. Esquema de un sensor de Sol de tipo interno en arreglo cruzado.

Se puede apreciar que existe en la parte superior una ventana cuadrada de longitud “ l ” utilizada como máscara, ésta permite que la iluminación en las dos celdas de cada eje, sea la misma cuando el Sol se encuentra perpendicular a las mismas. La electrónica utilizada, está calibrada para que en esta condición, la salida de voltaje tenga un valor intermedio, y a medida que el ángulo se incrementa o disminuye, el voltaje varía proporcionalmente al ángulo de desviación y además lo hace de manera lineal. Con estos arreglos es posible obtener una precisión de 0.1 grados.

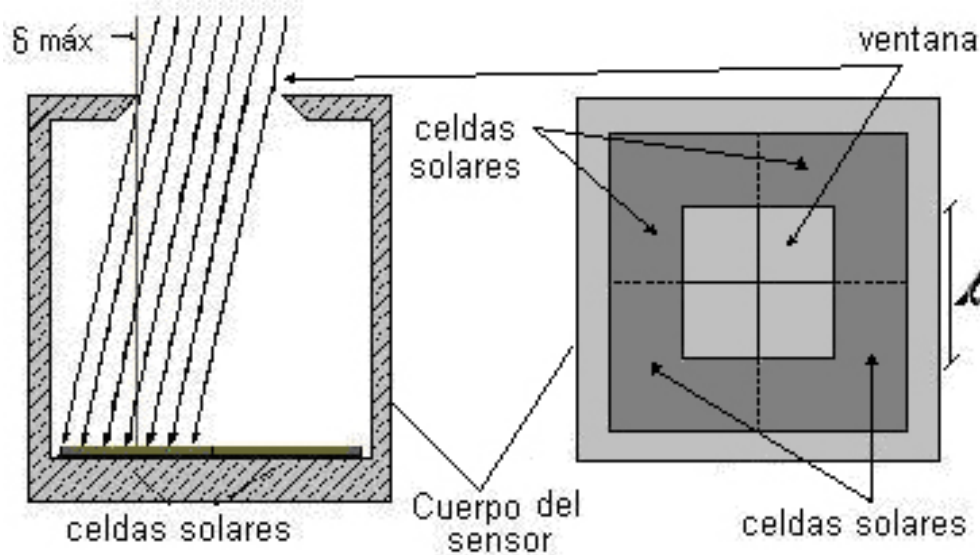


Figura 1.11. Esquema de un sensor de Sol de tipo interno en arreglo cuadrado.

Una configuración que permite lograr una resolución menor a 0.1 grados, es la que se logra al proyectar, por métodos ópticos, un pequeño disco solar sobre una superficie prismática como se muestra en la [figura 1.12](#).

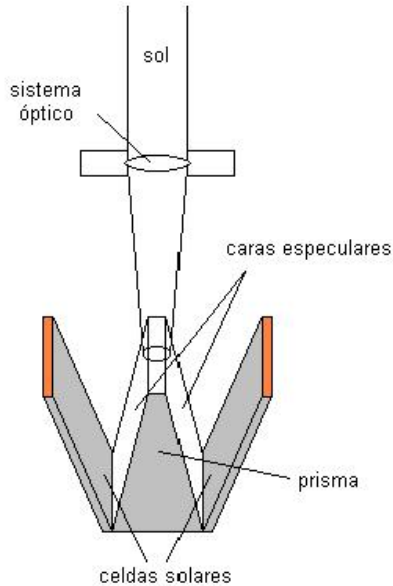


Figura 1.12. Esquema de un sensor fino de Sol de campo visual reducido.

Una ligera desviación en el apuntamiento provoca que el pequeño disco proyectado, tienda a iluminar más a uno de los dos espejos del prisma, por lo que la señal en la celda solar correspondiente es incrementada con relación a la otra. Estando el disco centrado en el vértice de los espejos, sólo una pequeña porción es reflejada por ambos espejos a sus respectivas celdas solares, provocando una señal idéntica en ambas, y por tanto, la anulación de las mismas por la electrónica, indicando un ángulo de apuntamiento cero. La desventaja principal de este método de detección es el limitado campo de visión del dispositivo, pero tiene la ventaja de proporcionar una alta resolución.

1.3.2.2. Sensores analógicos con arreglos lineales de fotodiodos.

También es posible detectar la desviación con respecto al vector solar con un esquema similar al utilizado con celdas solares en un arreglo cuadrado, pero reemplazándolas por conjuntos de diodos en una distribución también cuadrada. Para este caso es utilizado un sistema óptico para enfocar el disco solar sobre la unión central de los fotodiodos. Esto posibilita que las cuatro secciones de detectores vean parte del disco solar. Se utiliza electrónica similar para proveer dos señales de voltaje proporcionales a los ángulos de desviación en los ejes de rotación y cabeceo. El arreglo de los fotodiodos y la óptica se muestran en [la figura 1.13](#).

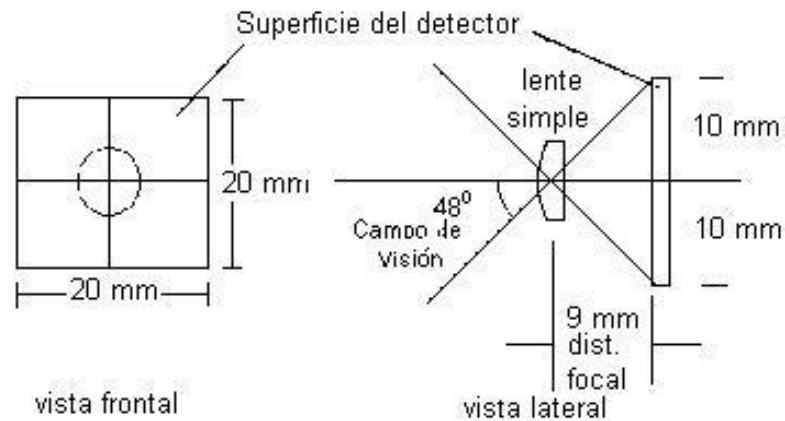


Figura 1.13. Esquema de un sensor de Sol de tipo interno con fotodiodos en arreglo cuadrado y sistema óptico de enfoque.

Un sensor solar con arreglos lineales de fotodiodos es otra manera de conformar un dispositivo de detección de la orientación. Su electrónica de acondicionamiento es mucho más sencilla y tiene una precisión del orden de 0.2 grados. Se pueden acomodar dos arreglos en forma perpendicular para detectar dos ejes independientes (Landis Geoffrey, 2000).

Su respuesta es proporcional a la intensidad de luz que recibe. La electrónica de acondicionamiento consiste básicamente en un amplificador operacional en modo inversor. Dado que la intensidad solar en el espacio es del orden de los 1350W/m^2 , es necesario utilizar un filtro óptico de densidad neutra para evitar la saturación de los detectores. La salida analógica es un voltaje de DC, por lo que es necesario utilizar un convertidor analógico digital para poder interpretar la información de orientación en grados en la computadora de abordo.

Aún cuando la principal aplicación de este tipo de sensores es determinar la orientación de un satélite con respecto al Sol, también puede ser utilizado para obtener información, al funcionar en modo de barredor en una sola dimensión, para medir la intensidad solar a través del cielo.

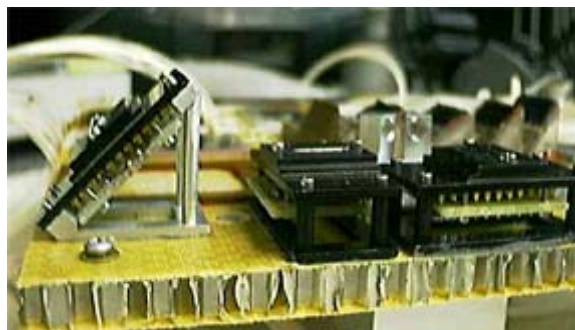


Figura 1.14. Mesa de pruebas de un sensor solar con arreglo de fotodiodos.

1.3.2.3. Sensores digitales.

En los sensores digitales se obtiene directamente una lectura en formato binario, esto es, la desviación del vector solar en un eje es detectada por varios sensores dispuestos en forma tal que proporcionan directamente desde el bit más significativo, hasta el menos significativo; es decir, contiene máscaras que permiten el paso de la iluminación solar y ésta genera estados altos y bajos en las celdas solares. Este concepto es ilustrado en la figura 1.15.

Puesto que la luz incidente entra por una ranura, ésta debe estar dispuesta a lo largo del eje de referencia del cual se desee conocer la desviación. Por lo tanto, se tiene la desventaja de detectar la desviación del vector solar sólo en uno de los ejes (en este tipo particular de sensor). También se debe tener especial cuidado al construir las máscaras de cada una de las celdas solares y si se requiere conseguir mayor resolución de lectura, ya que el bit menos significativo requerirá mayor número de máscaras (tantas como diferentes combinaciones requiera la lectura). Esto es una desventaja desde el punto de vista de manufactura para resoluciones altas.

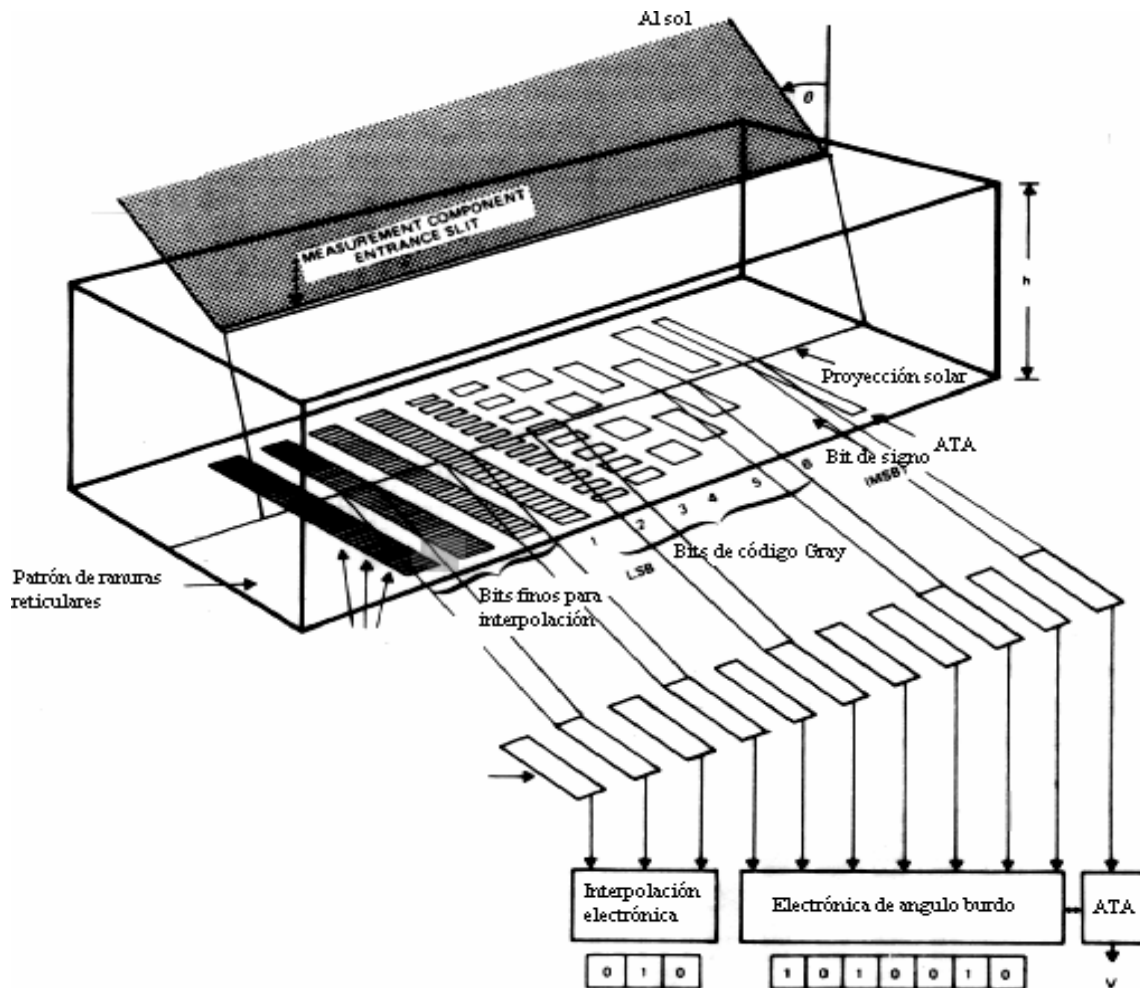


Figura 1.15. Sensor de Sol de tipo digital.

1.3.2.3.1 Sensores con arreglos CCD.

Los sensores CCD (Charge-Coupled Device, Dispositivo de Carga Acoplada) son elementos electrónicos que poseen una estructura de células sensibles a la luz, en forma de mosaico, cada una de esas células es lo que se denomina *pixel*. Cada pixel es una estructura detectora que es capaz de almacenar fotones.

Cada pixel tiene una dimensión del orden de unos diez micrómetros. Esta estructura tan pequeña no solo almacena los fotones en forma de carga eléctrica, sino que también dispone de una estructura capaz de transferir los fotones recogidos (en forma de cargas eléctricas) a un pixel adyacente.

Su funcionamiento es el siguiente: el sensor CCD es expuesto a la luz durante un tiempo denominado tiempo de integración, tras el cual los fotones que han sido almacenados en cada pixel son transferidos de forma ordenada a una etapa de salida. Ésta no es más que un amplificador que se encarga de convertir la carga que posee cada pixel en un voltaje.

Por tanto, un sensor CCD es un elemento que nos permite evaluar de forma cuantitativa la luz que ha incidido sobre cada uno de sus pixeles, pues a cada uno de ellos les hace corresponder una tensión eléctrica proporcional a la cantidad de fotones que ha almacenado.

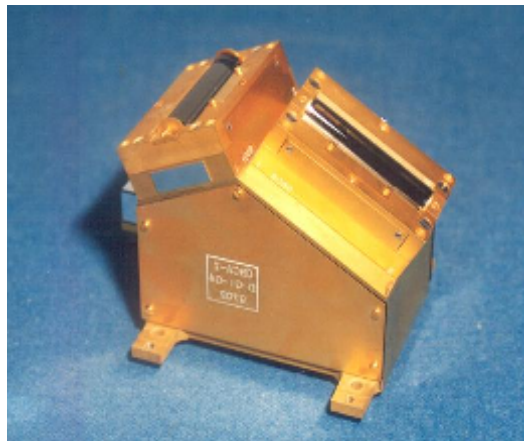


Figura 1.16. Ejemplo de un Sensor Solar de 3 ejes con arreglos CCD.

1.3.2.3.2 Sensores con arreglos CMOS.

El chip sensor CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor, Semiconductor Complementario de Óxido metálico) no sólo incluye los fotodiodos sino que también integra toda la electrónica necesaria para el control y lectura de éstos, así como el conversor analógico-digital, lo que se traduce en un menor tamaño de los circuitos necesarios para la captura de imágenes. Esto supone que la superficie necesaria para

captar la luz, con un mismo tamaño de celda, es menor que en un CCD, pero tiene la gran ventaja de poder acceder a la información almacenada no solo en la totalidad del dispositivo, sino también a una zona particular de éste.

En la tabla 1.3, se muestran las características principales de aquellos dispositivos que fueron considerados al hacer un estudio comparativo de las diferentes opciones de sensores solares para este trabajo de tesis.

TABLA 1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS DISTINTOS SENSORES CONSIDERADOS PARA ESTE PROYECTO (ANALÓGICOS Y DIGITALES).

SENSOR	COMPAÑÍA QUE LO FABRICA	PRECISIÓN	ÁNGULO DE COBERTURA	PESO	EJES	TIPO DE SENSOR
Sensor solar	ADCOLE	< 0.1°			1 eje	Analógico con arreglo de fotoceldas
Sensor solar	NASA	0.15°	+/- 45°	18 gramos sin la electrónica de acondicionamiento.	1 eje	Analógico con arreglo lineal de fotodiodos
Sensor solar de amplia cobertura	Goodrich sun sensor assembly	< 0.3°	+/-168°	425 gramos	1 eje	Analógico con arreglo ccd.
Sensor de mediana precisión	AEROASTRO	0.5° - 1.0°	+/-134°	36 gramos	1 eje	Analógico con fotodiodos.
Sensor solar burdo.	AEROASTRO	5°	+/-120°	20 gramos	1 eje	Analógico con fotodiodos
Sensor Solar Digital UiO	Universidad de Oslo	0.06°	120°	250 gramos	1 eje	Digital con arreglo CMOS
Sensor Solar Digital.	SURREY Satellite Technology	1°	+/-50°	300 gramos	2 ejes	Digital con celdas solares
Sensor Solar Digital de bajo costo	EADS SODERN	0.02°	+/-120°	300 gramos	2 ejes	Digital con CMOS
DSS2	Academia China de Tecnología Espacial	0.05°	+/-64°	350 gramos	3 ejes	Digital con arreglo ccd

1.4. El medio ambiente espacial.

Uno de los aspectos más importantes que no se debe soslayar durante el diseño de cualquier equipo que pretenda ingresar en la órbita terrestre, es el medio ambiente espacial; ya que éste afecta directamente el comportamiento de los equipos. Hay que considerar también los requisitos que los sistemas de cohetes de lanzamiento imponen a las naves espaciales y establecer un mínimo de pruebas que un equipo debe cumplir para quedar calificado para vuelo orbital (Prado 1993). Esto cobra cada vez más relevancia debido a que muchos microsátélites incluyen componentes de tipo comercial.

El estado en el que se encuentran el Sol, la heliosfera y la parte superior de nuestra atmósfera con su entorno, con especial énfasis en las condiciones que puedan afectar a nuestro planeta, determinan el clima espacial, es decir, es el conjunto de fenómenos e interacciones que se desarrollan en el medio interplanetario. Éste está regulado fundamentalmente por la actividad que se origina en el Sol y afecta a tanto a los satélites que se encuentran fuera de la cubierta protectora de la atmósfera como a los planetas del sistema.

Las condiciones ambientales en las cuales los satélites, sondas espaciales y astronautas deben operar son muy diferentes a aquellas encontradas en nuestro hábitat, la Tierra. Las mismas presentan múltiples riesgos, la mayoría de ellos directamente relacionados con fenómenos producidos en el Sol. Dichos riesgos involucran tanto el peligro de grandes dosis de radiación para los astronautas, como potenciales fallas en el equipamiento a bordo llegando a estar en peligro la nave misma. Por otra parte, es necesario tener en cuenta que las condiciones a las que la nave espacial está sujeta varían durante el lanzamiento, el despegue y en la órbita final.

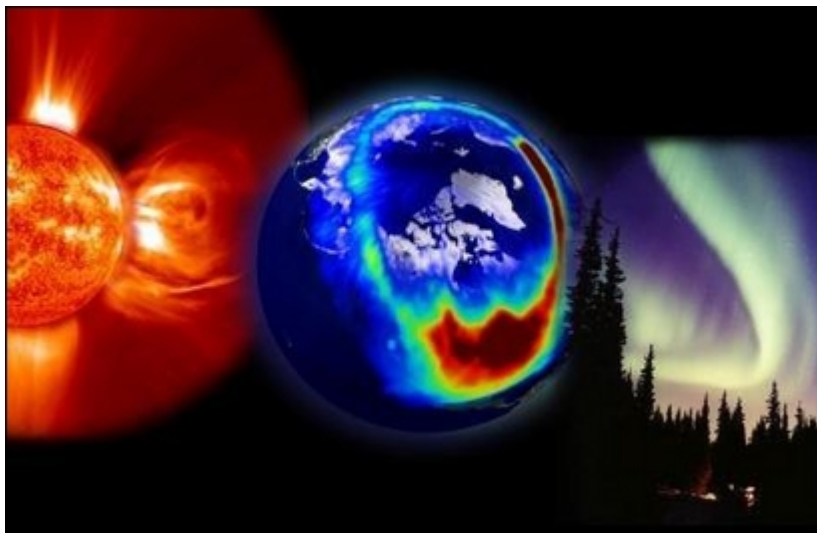


Figura 1.17. De la misma manera que el clima en la Tierra está estrechamente ligado a la actividad del Sol, el “clima” en el resto del Sistema Solar es afectado por la actividad solar y la radiación cósmica

Para una gran diversidad de funciones, los satélites permanecen habitualmente largos períodos en el espacio, por lo que no es improbable que se crucen en su trayectoria partículas cargadas de alta energía, que pueden llegar a atravesar sin problemas capas de hasta 4cm de aluminio. Otra consecuencia es que el “ruido electrónico” de cierta intensidad puede llegar a causar errores en las corridas de programas por medio de alteraciones espontáneas y sin causa aparente de bits almacenados (de 0 a 1 o viceversa). Entonces llega a suceder que un mismo programa corrido dos veces con los mismos parámetros de entrada genera dos resultados finales distintos. En general estos efectos no alteran el funcionamiento de una computadora a nivel de chip, ya que el sistema puede hacer una verificación y corregir el error antes de que un bit incorrecto sea utilizado. Estos errores pueden ser ocasionados en la Tierra por las cascadas generadas por rayos cósmicos galácticos, ya que las partículas que contienen las mismas pueden partir los átomos de los semiconductores de los que constan los circuitos integrados y eso puede producir una cascada de electrones que afecta al sistema electrónico. Investigaciones en chips de memoria RAM estática han concluido que estos eventos ocurren 13 veces más seguido a 3100 m de altura, que al nivel del mar, algo totalmente consistente con el hecho de que el chubasco de rayos cósmicos se va atenuando a medida que va descendiendo a la parte más baja de la atmósfera.

Los satélites de órbitas bajas también pueden empezar a perder altura, reingresar a la atmósfera e incendiarse o impactar la superficie de nuestro planeta. Esto se agudiza durante las tormentas espaciales, ya que la atmósfera se expande debido al aumento de energía ingresada, lo cual empieza a producir fricción sobre la nave. Los satélites que circundan la Tierra por mucho tiempo deben poseer mecanismos de inyección a órbitas más elevadas para compensar estas pérdidas. La radiación ultravioleta se hace sentir en especial en el largo plazo, ya que lleva a un envejecimiento prematuro de sistemas electrónicos, celdas solares y material estructural.

Existen características del ambiente espacial que se mantienen constantes mientras el satélite o sonda espacial se encuentra en órbita, como son la falta de gravedad y el vacío que lo rodea; pero hay otras que varían constantemente vinculadas a la presencia o ausencia de energía solar. Finalmente, existen condiciones que presentan características probabilísticas, como la radiación cósmica. Mucho se ha investigado y avanzado en el tema desde los inicios de la era espacial en 1957. Este conocimiento ha permitido, a los diseñadores y fabricantes de satélites, construir naves espaciales altamente resistentes, pero no enteramente inmunes a las variaciones del ambiente espacial.

Obviamente, el clima espacial determina muchos de los aspectos tecnológicos del satélite. Algunos de ellos resultan favorables y pueden representar ventajas para los diseñadores, aunque simultáneamente pueden ser factores de peligro de los que se debe proteger al satélite. Por ejemplo, la radiación solar es una fuente segura de energía, pero también puede causar efectos negativos en la orientación de la nave y en los paneles solares; la condición de vacío dificulta la lubricación y puede producir la expulsión de moléculas y soldaduras en frío entre partes metálicas (Rodríguez 2003).

La radiación ionizante en el medio ambiente espacial, cerca de la Tierra, es generalmente más densa que en el espacio interplanetario (Logsdon 1996). Los circuitos electrónicos que funcionan en este ambiente corren un gran riesgo ya que pueden ser afectados o dañados por las tormentas solares; debido a que el viento solar distorsiona el campo magnético, produce carga estática en las naves e inclusive llega a interrumpir las comunicaciones. Los rayos cósmicos causan problemas en los microprocesadores y otros

circuitos integrados, provocan cambios en los estados lógicos y también pueden causar daño total. Los cinturones de radiación de Van Allen, atrapan partículas altamente energéticas que degradan las celdas solares, cambian los estados lógicos, provocan arcos eléctricos y causan interferencia electromagnética.

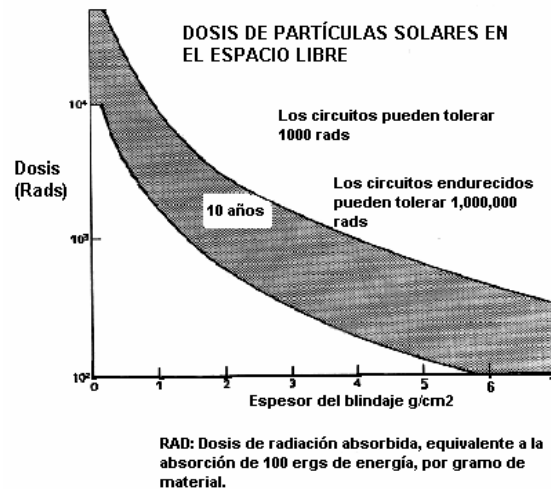


Figura 1.18. Protección metálica contra la radiación ionizante.

La protección contra la radiación se obtiene realizando un apropiado diseño geométrico, utilizando cubiertas o ventanas de zafiro, blindando los componentes sensibles con placas metálicas, utilizando revestimientos ópticos en las cubiertas o ventanas de los detectores. La protección más utilizada contra daño por radiación en las celdas solares de silicio, es el zafiro artificial; y se ha preferido por su resistencia a la degradación en un ambiente de radiación y su relativa alta densidad comparada con el cristal. La figura 1.18 nos muestra cual debe ser la densidad del blindaje para lograr una protección adecuada contra la radiación. Es muy importante conocer la altura de la órbita para determinar la protección adecuada.

1.5. Filtrado de señales.

El proceso de filtrado de las señales de sensores abordo de vehículos que funcionan fuera de la atmósfera terrestre es muy importante, ya que estos dispositivos funcionan bajo las condiciones extremas del medio ambiente orbital, donde existen gradientes de temperatura que pueden oscilar entre 90 y 120 °C, radiación ionizante, alto vacío y viento solar. Además existe ruido generado por corrientes inducidas dentro de la propia nave, que pueden afectar las lecturas de los sensores. Esto crea la necesidad de implementar un mecanismo de filtrado (Prado J. 2007).

Existen muchos métodos disponibles que pueden ser usados como eliminadores de ruido, incluso hay los que se especializan en la predicción de valores. Estos últimos son indispensables en sistemas que necesitan contar con anticipación con un valor estimado,

a partir de los datos actuales, aplicando técnicas probabilísticas, un ejemplo de esto es el filtro Kalman. Estrictamente hablando, el filtro Kalman es un estimador del estado instantáneo de un sistema dinámico lineal, perturbado por ruido blanco gaussiano; no obstante, cubre perfectamente la función de un filtro. Esta técnica se utiliza ampliamente para el control de sistemas dinámicos complejos y nuestro interés inmediato estará enfocado en su implementación en la determinación de la órbita y la orientación de nuestro satélite a partir de los datos obtenidos por el magnetómetro.

Con la finalidad de comprobar algunos de los aspectos básicos del filtrado digital de señales, se desarrolló un método sencillo de ajuste a una curva de segundo grado. Este fue implementado en un microcontrolador con la ayuda de rutinas de punto flotante (Ruiz D. 2003). Los resultados han sido aplicados en el proceso de compensación de la respuesta de los sensores utilizados para el desarrollo de sistemas de adquisición de datos en subsistemas satelitales. (Miranda V.M 1998 y Ruiz, D. 2003).

DETECTORES DE POSICIÓN SOLAR

En el laboratorio de Percepción Remota Alternativa y Tecnología Avanzada del Instituto de Geografía de la UNAM, ha sido desarrollado un sensor de Sol para detección de orientación de satélites pequeños, sin embargo, como sus elementos principales de detección están constituidos por celdas solares, se tiene el inconveniente de que éstas presentan variaciones importantes en su respuesta al estar funcionando en órbita terrestre. Las celdas fotovoltaicas cambian su respuesta de salida al experimentar una degradación a causa de la radiación ionizante y por diferencias de temperatura. Para contrarrestar estos efectos, ha sido necesario implementar una estrategia de calibración, que ha resultado bastante complicada, ya que fue indispensable modelar el efecto de la degradación y utilizar sensores de temperatura para hacer las lecturas y ajustes correspondientes (Ruiz, 2003).

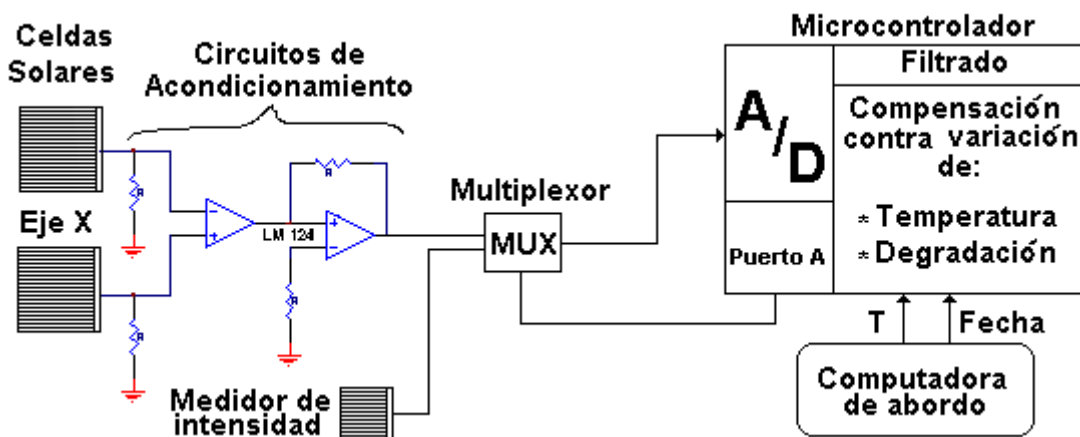


Figura 2.1. Diagrama de bloques donde se muestra la conexión del sensor de sol con la computadora de abordo donde se efectúa la calibración contra cambios de temperatura y degradación de las celdas solares.

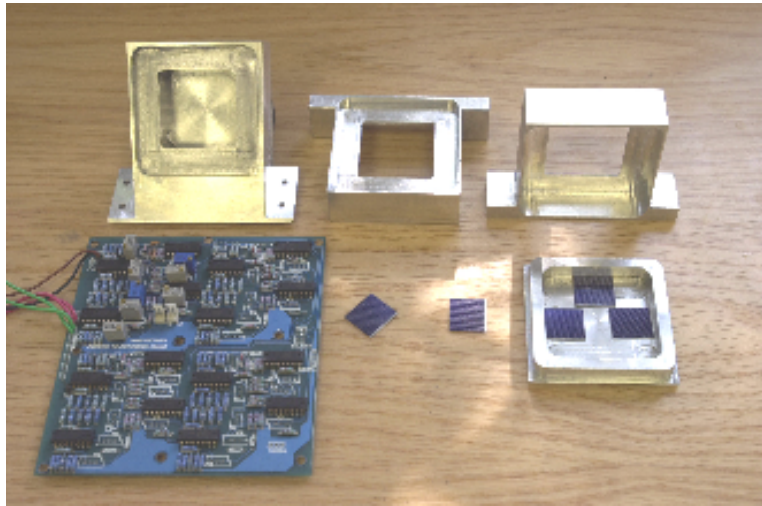


Figura 2.2. Sensor de sol basado en un arreglo de cuatro celdas solares y circuito impreso con la electrónica de acondicionamiento.

Debido a la complejidad que el sensor basado en la respuesta de un arreglo de celdas solares representa, es necesario llevar a cabo un nuevo diseño, en el cual, la detección de la orientación esté representada únicamente por las lecturas de la posición del sol y que sea inmune a las variables antes mencionadas. Se propone utilizar una clase de detector que solamente sea sensible a la luz, con un arreglo que permita obtener la orientación en dos ejes independientes y que cuente con los componentes adecuados de atenuación de la luz solar (filtros ópticos) y los elementos electrónicos para adecuar y filtrar las señales eléctricas y convertirlas en una medida directa de orientación, en grados.

Necesitamos realizar el diseño de un sensor de Sol que no presente variabilidad durante su funcionamiento en órbita terrestre, para lo cual se pensó en utilizar como detector algún arreglo de elementos tal como un sensor CCD, CMOS o un arreglo lineal de fotodiodos.

En este capítulo se hace referencia a estos tres tipos de detectores como sensores de posición solar y se estudian sus características.

2.1. Posibles detectores (CCD, CMOS y fotodiodos).

Un CCD es un dispositivo de estado sólido cuya estructura utiliza columnas verticales y filas horizontales de fotodiodos para convertir la energía luminosa en cargas eléctricas. Las cargas se almacenan y después se transfieren a la etapa de salida del dispositivo. La corriente de descarga, correspondiente a los diferentes niveles de luz, a través de una resistencia de carga, puede interpretarse como una variación de voltaje con respecto al tiempo, manifestada como señal de video.

Sobre el sustrato de silicio, existe una película delgada de óxido (layer) que proporciona un excelente aislamiento, y sobre esta película de aislamiento se coloca una tira

conductiva llamada *gate* (compuerta). El sustrato y la compuerta deben estar conectados a dos voltajes externos. La mayoría de las veces el sustrato estará conectado a un voltaje fijo de DC. Si el voltaje en la compuerta es positivo con respecto al sustrato, entonces la magnitud del campo eléctrico interno causa atracción a los electrones (carga negativa).

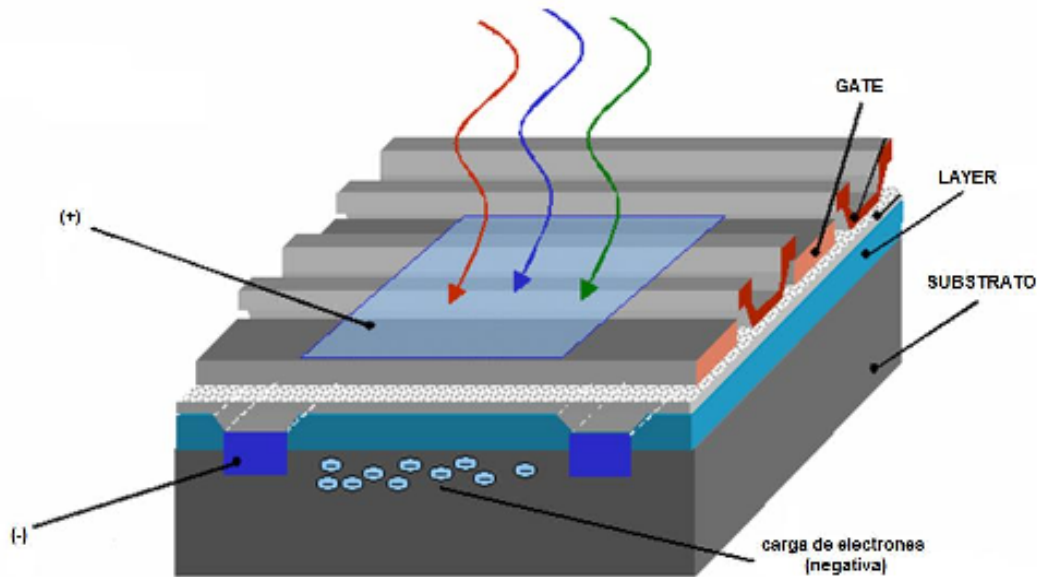


Figura 2.3. Sensor CCD, donde se muestran sus componentes principales.

Cuando el voltaje de la compuerta es negativo, como una consecuencia, todos los electrones serán expulsados hacia la parte inferior de éste, de esta forma, ninguna carga estará presente.

Por otra parte, los sensores de imagen CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor ó semiconductor complementario de óxido metálico), son un tipo de tecnología de semiconductores ampliamente usado. Los semiconductores CMOS utilizan circuitos NMOS (polaridad negativa) y PMOS (polaridad positiva). Dado que sólo un tipo de circuito está activo en un tiempo determinado, los chips CMOS requieren menos energía que los circuitos integrados que usan sólo un tipo de transistor. Son diseñados con arreglos bidimensionales de fotodiodos, que cuentan con circuitos internos que efectúan una auto exploración para leer los valores de intensidad luminosa de cada uno de sus elementos.

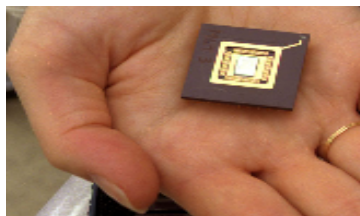


Figura 2.4. Arreglo bidimensional de un sensor CMOS.

Finalmente, los fotodiodos son componentes optoelectrónicos que generan un voltaje de corriente continua proporcional a la cantidad de luz que incide sobre su superficie, es decir, son diodos de unión PN cuyas características eléctricas dependen de la cantidad de luz que incide sobre la unión. Se utilizan como medidores y sensores de luz y en receptores ópticos de comunicaciones. Los fotodiodos tienen una amplia respuesta espectral y un alto nivel de sensibilidad a la luz ultravioleta.

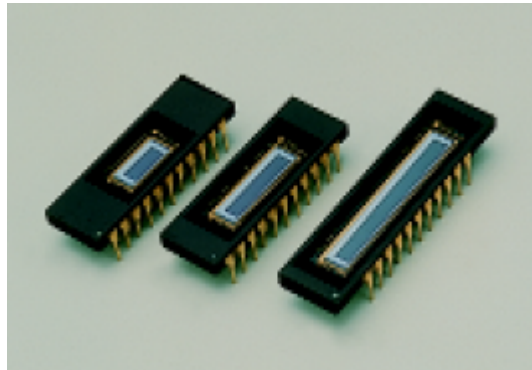


Figura 2.5. Arreglos lineales de fotodiodos de la empresa Hamamatsu™.

2.2. Sensores CCD

El CCD es un circuito integrado basado en un arreglo bidimensional de elementos de imagen (figura 2.6). La característica principal de este circuito es que posee una matriz de celdas con sensibilidad a la luz, alineadas en una disposición físico-eléctrica que permite empaquetar en una superficie pequeña, un enorme número de elementos sensibles y manejar esa gran cantidad de información de imagen (para llevarla al exterior del microcircuito) de una manera relativamente sencilla, sin necesidad de grandes recursos de conexiones y de circuitos de control. Estas características convirtieron a los CCD en un elemento clave para el desarrollo de las actuales cámaras de vídeo y fotográficas, extremadamente miniaturizadas y de gran calidad de imagen. Existen también arreglos lineales de elementos sensibles que leen otro tipo de información, como los lectores de los escáneres, faxes, clasificadores de cartas y documentos, etc.

El circuito integrado posee varios conjuntos de capacitores alineados uno junto a otro, que se encuentran acoplados eléctricamente entre sí, y pueden transferir su carga al siguiente elemento usando un ingenioso método basado en campos eléctricos. Los elementos sensibles a la luz son los propios capacitores, que se cargan o descargan dependiendo de cómo ésta incide en ellos, y además funcionan como cada uno de los bits de un registro de desplazamiento. Gracias a esta capacidad, la información se extrae del circuito integrado CCD en serie, línea por línea, algo muy conveniente cuando se trata de una imagen de video (Carletti 2007).

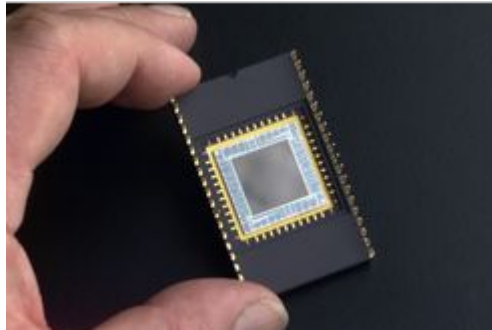


Figura 2.6. Sensor CCD

Después de la exposición, las cargas en la primera fila se transfieren a un lugar en el sensor llamado registro de lectura. De allí, las señales se alimentan a un amplificador y luego a un convertidor analógico-digital. Una vez que la fila se ha leído, sus cargas se borran, la fila entera entra, y todas las que están por encima se mueven abajo una línea. Las cargas en cada fila son "acopladas" a aquéllas en la fila de arriba para que cuando una baje, la próxima se mueva también hacia abajo para llenar su espacio. De esta manera, cada una puede ser una fila de lectura por vez (Figura 2.7).

El CCD cambia una fila entera a la vez al registro de lectura. Éste luego envía sólo un píxel a la vez al amplificador de salida.

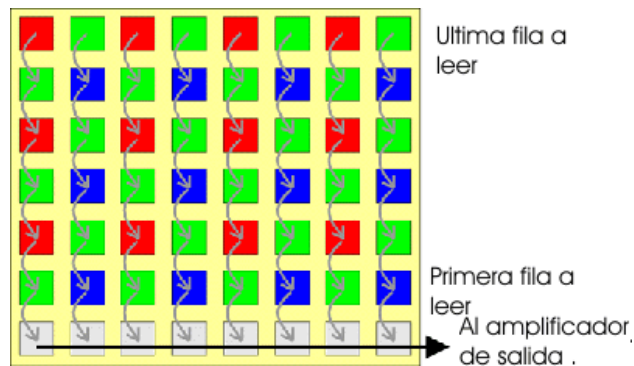


Figura 2.7. Sensor de imagen CCD.

Por supuesto no todos los fotones que les llegan son transformados en electrones. La relación entre fotones recibidos y carga acumulada se define como eficiencia cuántica.

Esta eficiencia es diferente según la longitud de onda en que viaje el fotón, siendo mayor en las longitudes próximas al infrarrojo (700 nm) y menor en el resto. Esto hace que estos dispositivos, llamados photodos, sean más sensibles en el infrarrojo que en el azul. Casi todos los CCD's llevan un filtro para bloquear el infrarrojo.

Los photodos tienen una limitación en la capacidad máxima de carga, que va en función del tamaño de estos pequeños dispositivos. Así, para un tamaño de aproximadamente $12\mu\text{m}$ cuadrados, la capacidad de carga está limitada a unos 350,000 electrón - voltios.

A medida que el photodo alcanza el máximo de su capacidad de carga, rebosa parte de la misma a los elementos adyacentes, produciéndose un efecto llamado 'blooming' (floración). Para reducir este efecto, algunos CCD's están dotados de un dispositivo anti-blooming, que detecta el llenado de un photodo y lo desactiva. Normalmente la detección se realiza a un 80% de la capacidad de carga del photodo, y el efecto blooming no se limita más allá del 30%. Esto es, perdemos un 20% de sensibilidad a cambio de que no más del 70% de la carga de un determinado photodo pase a los adyacentes. Cuando la relación costo beneficio no parezca rentable, se puede desactivar el anti-blooming y enfriar externamente el dispositivo para aumentar su capacidad de almacenar carga.

Otra particularidad de los CCD's es la distribución de los photodos. Normalmente éstos están organizados en filas. El procedimiento de lectura consiste en ir traspasando la carga de cada photodo de una misma fila a la siguiente y de ésta a la siguiente y así hasta que la carga llega a una hilera de photodos especiales, que la volcarán a un circuito de preamplificación llamado CCS o CIS, para su transformación de analógico a digital. La frecuencia a la que las hileras van traspasando su carga a la de descarga, está marcada por el refrescamiento horizontal (normalmente de unos pocos KHz), y la frecuencia a la que los photodos traspasan su carga al que definitivamente la transfiere fuera, se establece por el refrescamiento vertical (en ocasiones se llega a los MHz). Esto es lo que sería una descarga progresiva de todos los photodos.

Existe la posibilidad de realizar una descarga no progresiva de los photodos. En una primera pasada se descargan las hileras pares y en la siguiente las impares. Es la denominada interpolación de imágenes.

Otra forma de producir las descargas, es acumular la carga de varios photodos en uno sólo. Es lo que se denomina 'binning'. Esta técnica aumenta drásticamente la sensibilidad, pero no necesariamente aumenta la precisión de la muestra. Este es el proceso de combinación de carga desde pixeles adyacentes en un CCD durante la captura de imagen y es previo a la digitalización en la circuitería del CCD por los registros especializados de control consecutivos y paralelos. Las dos ventajas principales del 'binning' son las de mejorar la relación señal a ruido (SNR) y la capacidad para aumentar la frecuencia de cuadros por segundo, a cambio de una resolución espacial reducida.

Ni todos los modelos son iguales ni todos los dispositivos son perfectos. La fábrica de CCD no fabrica un sólo nivel de calidad, sino que algunas unidades salen con más defectos que otras. A un CCD perfecto, en el que todos los photodos funcionan y tienen un nivel de correlación lineal menor al 5% (la diferencia medida en la carga de dos photodos que teóricamente reciben la misma luz es menor del 5%) se le denomina GRADO 0, es el más difícil y costoso de conseguir. Para un uso habitual, con un GRADO 2 o 3 es suficiente para la mayoría de las aplicaciones. Esto hará que las tomas tengan una zona más oscura o clara y/o que una determinada columna siempre salga blanca o negra. La diferencia de precio entre un GRADO 0 y un GRADO 3 puede ser hasta 6 veces superior.

2.3. Circuitos CMOS

CMOS es un dispositivo semiconductor formado por dos transistores de efecto de campo de óxido metálico (MOSFET), uno del tipo n (NMOS) y otro del tipo p (PMOS), integrados en un único chip de silicio.

Utilizados por lo general para fabricar memoria RAM y en algunas aplicaciones de conmutación, estos dispositivos se caracterizan por una alta velocidad de acceso y un bajo consumo de energía. Pueden resultar dañados fácilmente por la estática ([Fonostra 2007](#)).

Las características de la tecnología utilizada, en la familia de circuitos integrados CMOS, condiciona los parámetros que se describen en sus hojas de características que difieren según el fabricante (aún siendo estándar), algunas de ellas son:

- La tecnología utilizada para fabricar la familia de circuitos integrados lógicos CMOS, admite una amplia gama de tensión de alimentación que se halla comprendida entre los 3 y los 15V o más, no obstante, se recomienda utilizar un máximo de 12V para evitar un deterioro prematuro. Debido a este amplio rango, los niveles lógicos vienen definidos a su vez por el intervalo de tensión comprendida aproximadamente entre los 0V y $1/3 V_{cc}$ para el estado L (bajo) y $2/3V_{cc}$ y V_{cc} para el estado H (alto).
- En el caso de la tecnología CMOS, ésta dispone de un intervalo de tensión para su alimentación como se ve, más amplio que la familia lógica transistor-transistor (TTL, la cual se encuentra entre 4.75V y 5.25V), con la ventaja adicional que su consumo es alrededor de 10 veces menor que el obtenido por la familia TTL.

2.3.1. Comparación entre los sensores de imagen CCD y CMOS

Los sensores de imagen se manufacturan en la industria, por medio de la fundición de obleas de silicio en hornos cerrados que contienen elementos químicos en forma gaseosa. La elevada temperatura hace que los átomos de gas se difundan y penetren en la oblea, cambiando las características eléctricas del mismo, donde luego, usando técnicas de fotograbado y mediante exposición a los rayos ultravioleta, se obtienen los circuitos diminutos sobre la oblea o sustrato. El problema más grande que tienen los CCDs es que no hay suficiente economía de escala, es decir, no se fabrican en grandes cantidades. Estos dispositivos se crean usando procesos caros y especializados que sólo pueden usarse para fabricar CCDs. Entretanto, muchas otras fundiciones están usando un proceso diferente llamado Metal-Oxido-Semiconductor con transistores complementarios (CMOS) para hacer millones de chips para los procesadores de computadoras y memorias. El CMOS es por mucho el proceso más común y de más alto rendimiento productivo en el proceso de fabricación de chips en el mundo. Los últimos procesadores de CMOS, como el Pentium 4-D, contienen casi 10 millones de elementos activos. Usando este mismo proceso y el mismo equipo para fabricar los sensores de imagen CMOS se reducen dramáticamente los costos fijos de la planta, porque éstos se extienden sobre un número mucho más grande de dispositivos. Como resultado de estas economías de escala, el costo de fabricar una oblea de CMOS es un tercio del costo de fabricar una oblea similar que usa un proceso de CCD especializado. Una desventaja importante de los sensores CMOS es el ruido, sin embargo, éstos tienen circuitos de

proceso creados en el mismo chip. El sensor CMOS puede integrar muchas funciones, tales como el procesamiento de señales para eliminación de ruido o la conversión analógico/digital, mientras que en el CCD, éstos se realizan fuera del chip. Por otro lado el CMOS consume mucha menos energía, con lo que se evita que se eleve la temperatura, alargando su duración.

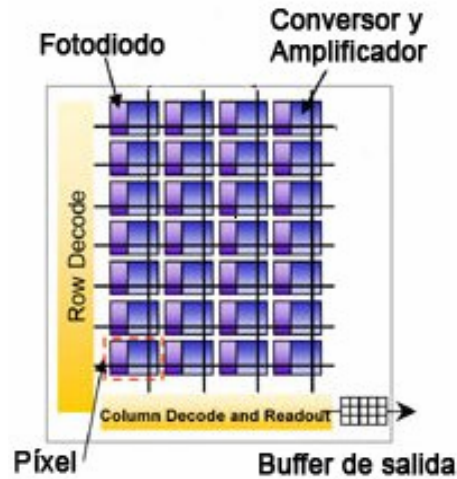


Figura 2.8. Diagrama simplificado de un Sensor CMOS

2.4. Fotodiodos.

El fotodiodo es un diodo semiconductor, construido con una unión PN, como muchos otros diodos que se utilizan en diversas aplicaciones; pero en este caso el semiconductor está expuesto a la luz a través de una ventana transparente y a veces en forma de lente, y por su diseño y construcción, será especialmente sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Todos los semiconductores son sensibles a la luz, aunque en el caso de los fotodiodos, su diseño y construcción están orientados a lograr que esta sensibilidad sea máxima. Se ha optimizado el proceso y forma de fabricación de modo que la influencia luminosa sobre su conducción sea la máxima posible. Esto se logra, por ejemplo, con fotodiodos de silicio en el visible y con fotodiodos de germanio en el IR.

Los diodos tienen un sentido “normal” de circulación de corriente, que es cuando se encuentran en polarización directa. El diodo deja pasar la corriente eléctrica y prácticamente no lo permite en el inverso: es la base del funcionamiento de un diodo. Pero en el fotodiodo la corriente que más nos interesa (y que varía con los cambios de la luz) es la que circula en sentido inverso, al permitido por la juntura del diodo. Es decir, para su funcionamiento el fotodiodo es polarizado de manera inversa y se producirá un aumento de la circulación de corriente cuando el diodo es excitado por la luz.

Lo que define las propiedades de sensibilidad al espectro electromagnético de un fotodiodo, es el material semiconductor que se emplea en su construcción. Los de silicio reaccionan a la luz visible y hasta los 1100 nm, los de germanio para luz infrarroja de 1100 hasta aproximadamente 1700 nm, y los hay también de otros materiales como puede verse [en la tabla 2.1 \(Carletti 2007\)](#).

Tabla 2.1 Intervalos del espectro electromagnético en donde el fotodiodo es sensible, de acuerdo con el material con que fue fabricado.

Material	Intervalo
Silicio	190–1100 nm
Germanio	800–1700 nm
Indio galio arsénico (InGaAs)	800–2600 nm
Sulfuro de plomo	1000-3500 nm

El efecto fundamental bajo el cual opera un fotodiodo es la generación de pares electrón - hueco debido a la energía luminosa. Este hecho es el que lo hace diferente del diodo rectificador en el que solamente existe generación térmica de portadores de carga. La generación luminosa, tiene una mayor incidencia en los portadores minoritarios, que son los responsables de que el diodo conduzca ligeramente en inversa (U. de Sevilla 2007).

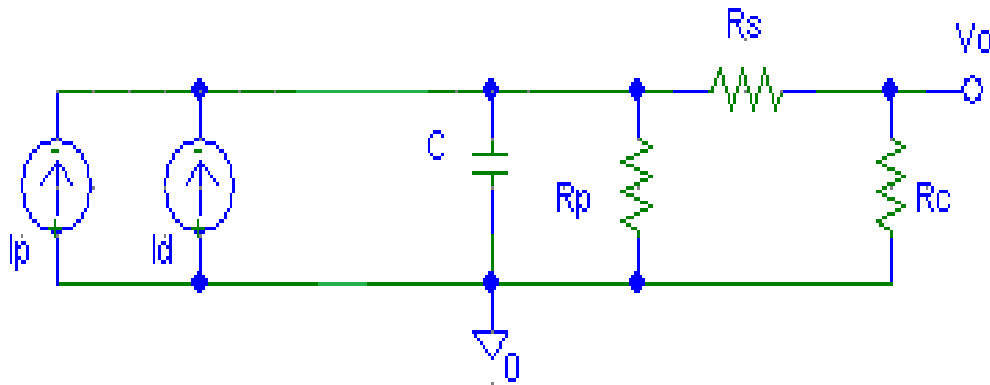


Figura 2.9. Circuito equivalente de un fotodiodo.

En esencia, el circuito de un fotodiodo es muy similar al de una celda fotovoltaica; con la diferencia de que al primero se le han añadido corrientes de fuga y ruido.

El voltaje de salida está dado por la relación que se especifica a continuación:

$$V_o = (I_p + I_d) \cdot R_c \cdot R_p / (R_c + R_p + R_s)$$

y las fuentes de corriente inversa son:

$$I_p = \alpha q \Phi A$$

$$I_d = I_o (\exp\{ q V / k T \} - 1)$$

Donde:

- α es el rendimiento cuántico del detector
- q es la carga del electrón
- Φ es la densidad de flujo incidente
- A es el área del detector
- I_0 es la corriente de saturación inversa
- V es la tensión aplicada al diodo
- k es la constante de Boltzmann
- T es la temperatura absoluta

Es conveniente aclarar que el rendimiento cuántico es una cantidad definida para un dispositivo fotosensible, como el porcentaje de fotones que chocan con la superficie fotoreactiva que producirá un par electrón-hueco. Es una medida precisa de la sensibilidad del dispositivo. A menudo se mide sobre un intervalo de diferentes longitudes de onda para caracterizar la eficiencia del dispositivo en cada energía. La película fotográfica tiene típicamente una eficiencia cuántica de menos del 10%, mientras los CCDs pueden tener del orden de 90% en algunas longitudes de onda.

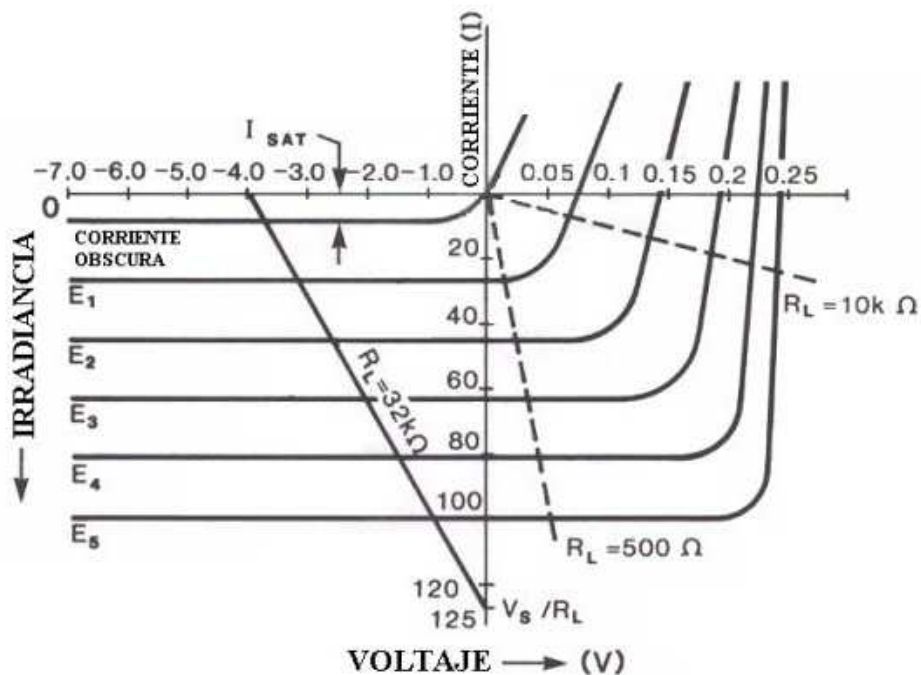


Figura 2.10. Curvas características de un fotodiodo.

Existen tres formatos clásicos de operación con un fotodiodo: circuito abierto (modo fotovoltaico), cortocircuito y polarizado en inversa (modo fotoconductor).

Un fotodiodo operado en un modo fotovoltaico es directamente conectado a una impedancia de carga sin usar una fuente de voltaje adicional. Entonces el potencial sobre el fotodiodo solamente es dado por la generación de corriente en el fotodiodo. El resultado es un incremento del campo eléctrico que produce un fotovoltaje V_P a través del

dispositivo que aumenta con el flujo de fotones recibido. Como en el caso de los generadores, el valor de potencia consumida es negativo, lo que hace que el fotodiodo se comporte en esta configuración como una fopila, que suministra potencia a partir de la luz recibida. No es usual encontrar un fotodiodo trabajando de esta forma, pero este comportamiento básico se emplea, con algunas modificaciones principalmente en cuanto a su extensión y a la optimización de la eficiencia cuántica, en las celdas solares o fotovoltaicas.

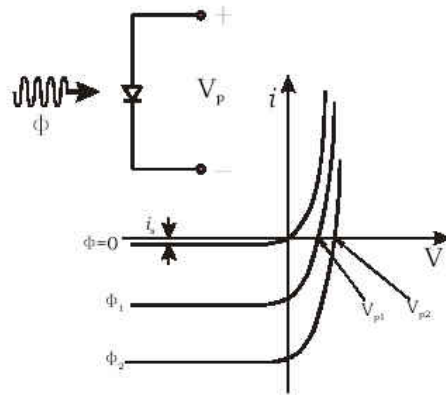


Figura 2.11. Esquema de fotodiodo operando en modo de circuito abierto

El fotodiodo operando en modo de cortocircuito ($V = 0$) presenta un esquema básico como el de la [figura 2.12](#). En este caso, la corriente por el circuito es simplemente la fotocorriente i_p .

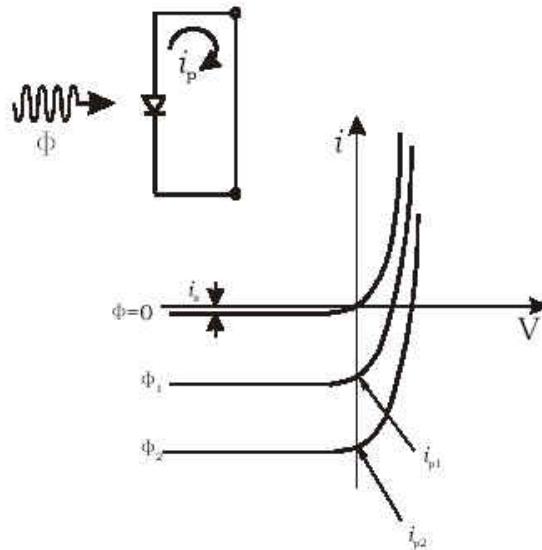


Figura 2.12. Esquema de fotodiodo operando en modo de cortocircuito.

Finalmente, el fotodiodo puede ser polarizado en inversa, con lo que funciona en su régimen típico, el fotoconductor, tal y como aparece en [la figura 2.13](#).

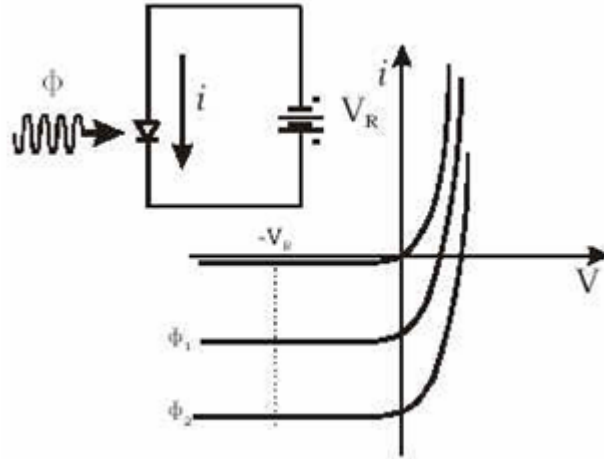


Figura 2.13. Fotodiodo en modo fotoconductor.

El comportamiento del fotodiodo en inversa se ve claramente influenciado por la incidencia de luz. Conviene recordar que el diodo real presenta unas pequeñas corrientes de fuga de valor I_s . Éstas son debidas a los portadores minoritarios, electrones en la zona P y huecos en la zona N. La generación de portadores debido a la luz provoca un aumento sustancial de portadores minoritarios, lo que se traduce en un aumento de la corriente de fuga en inversa.

El modelo eléctrico del fotodiodo en inversa está formado por un generador de intensidad cuyo valor depende de la cantidad de luz. En directa, el fotodiodo se comporta como un diodo normal. Si está fabricado en silicio, la tensión que cae en el dispositivo será aproximadamente 0,7 V. El comportamiento del fotodiodo en directa apenas se ve alterado por la generación luminosa de portadores. Esto es debido a que los portadores provenientes del dopado (portadores mayoritarios) son mucho más numerosos que los portadores de generación luminosa.

Para caracterizar el funcionamiento del fotodiodo se definen los siguientes parámetros:

- Se denomina corriente oscura, a aquella que circula en sentido inverso de lo normal en el fotodiodo cuando no existe luz incidente.
- Se define la sensibilidad del fotodiodo, como el incremento de intensidad al polarizar el dispositivo en inversa, por unidad de intensidad de luz, expresada en luxes o en mW/cm^2 .

Se fabrican fotodiodos con amplificadores integrados, compensación de temperatura y estabilización en el mismo chip. Con la integración se reducen los problemas debidos a corrientes de fuga, interferencias y picos de ganancia debidos a capacitancias parásitas.

Los fotodiodos se emplean no solo en comunicaciones ópticas y fotómetros, sino también para control de iluminación y brillo, control remoto infrarrojo, monitorización de mecheros de gas y de petróleo (radiación ultravioleta centrada en la banda de 310 nm), enfoque automático y control de exposición en cámaras. Combinados con una fuente de luz, se emplean en codificadores de posición, medidores de distancia, espesor, transparencia y como detectores de proximidad y de presencia. Para sensores de color, la luz incidente se hace pasar a través de un filtro rojo, azul o verde, antes de llegar al fotodiodo. El color se determina midiendo la corriente generada por la luz que atraviesa cada filtro. El problema de este método consiste en emplear una ventana transparente y dos diodos pin en cascada. La respuesta espectral de los diodos depende de la diferencia de potencial aplicada entre los extremos del conjunto; aplicando secuencialmente tres tensiones distintas, se detectan los tres colores básicos.

En la figura 2.14, vemos la respuesta del fotodiodo a un pulso de radiación con forma cuadrada. En ausencia de polarización, la respuesta es lenta debido al retraso que sufren las cargas en su migración hacia la superficie. Al aplicar una tensión inversa pequeña (5 V), las cargas generadas en la zona desierta son recogidas rápidamente y son responsables de la rápida respuesta inicial. Cuando la tensión aplicada es mayor, la zona desierta se extiende a toda la profundidad del dispositivo, dando un solo flanco de subida rápido.

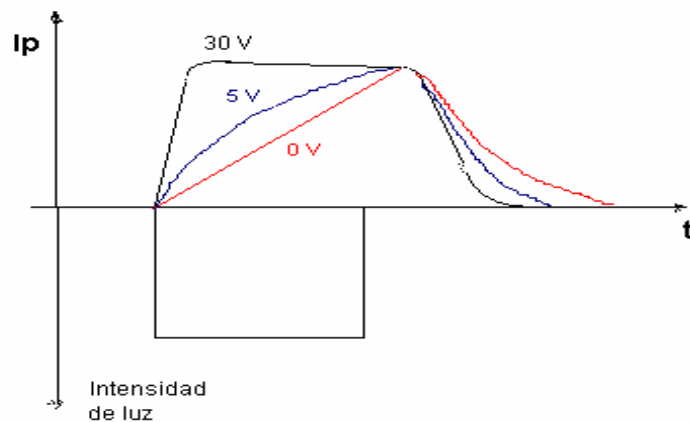


Figura 2.14. Velocidad de respuesta de un fotodiodo en función de la tensión de polarización inversa

2.4.1. Fotodiodos Schottky planares.

Estos dispositivos presentan una respuesta aproximadamente constante para excitación con radiación de energía superior al gap del semiconductor, independientemente de la potencia óptica y de la temperatura. Su respuesta espectral muestra un corte abrupto, con un contraste UV/visible de 10^3 . El tiempo de respuesta de estos dispositivos está limitado por su producto RC , con constantes de tiempo mínimas en el rango de nanosegundos. Se ha efectuado un análisis teórico de la respuesta de estos dispositivos, concluyéndose que está todavía limitada por la elevada densidad de dislocaciones existentes en este

material. De hecho, se ha verificado que los fotodiodos fabricados sobre GaN recreado lateralmente (GaN nitruro de galio, material semiconductor) presentan un rechazo al visible un orden de magnitud superior, mayor ancho de banda y mayor detectividad. Se ha demostrado que los fotodiodos Schottky son adecuados para aplicaciones medioambientales, como la evaluación la radiación UV solar, o para transmisión de datos a baja velocidad (MHz).

2.4.2. Diodos PIN

El diodo PIN es un dispositivo que presenta una región P fuertemente dopada y otra región N también con esta característica, separadas por una región de material que es casi puro. Este tipo de diodos se utiliza en [frecuencias](#) de microondas, es decir, aquellas que exceden de 1GHz, puesto que incluso en estas [frecuencias](#) el diodo tiene una impedancia muy alta cuando está polarizado en inversa y muy baja cuando esta polarizado en directa. Además, las tensiones de ruptura están comprendidas en el margen de 100 a 1000 V.

En virtud de las características del diodo PIN se puede utilizar como interruptor o como modulador de amplitud en frecuencias de microondas, ya que para todos los propósitos se puede representar como un corto circuito en sentido directo y como un circuito abierto en sentido inverso. También se puede utilizar para conmutar corrientes muy intensas y/o tensiones muy grandes ([Barber 2008](#)).

2.5 Arreglo lineal de fotodiodos

Los arreglos lineales tienen diferentes aplicaciones, debido a su geometría. En este caso los usaremos para detectar la orientación del Sol.

A diferencia de la mayoría de los arreglos con fotodiodos que utilizan un sistema de obtención de datos en tiempo real, el sensor seleccionado obtiene la información a través de un sistema de integración, es decir, el arreglo de fotodiodos al ser expuesto a la luz, va guardando temporalmente la información en forma de campo eléctrico en la capacitancia formada en las uniones de cada uno de los fotodiodos. Posteriormente la información es obtenida de forma secuencial con la ayuda de un conmutador que direcciona las cargas de cada uno de los fotodiodos. Por tanto, la salida del sensor es proporcional al producto de la intensidad de luz por el tiempo de integración.

El dispositivo seleccionado tiene 256 elementos, lo que permitirá tener una resolución de 0.2 grados con un campo de vista de ± 22 grados.

SENSOR SOLAR EN DOS EJES

El sensor solar que se ha seleccionado para determinar la orientación de un satélite pequeño, el cual será colocado en órbita baja, está compuesto por dos arreglos lineales de fotodiodos, que nos proporciona dos ángulos de orientación independientes en los ejes de alabeo (X) y cabeceo (Y).

3.1. Sensor solar con un arreglo lineal de fotodiodos.

Las necesidades que tenemos para la orientación, son determinantes al momento de elegir el sensor de Sol que mejor se adapte a las condiciones de operación. En nuestro presente caso de estudio se requiere que nuestro sensor solar tenga una cobertura máxima en el campo de visión y una resolución aproximada en la lectura de $\pm 0.2^\circ$. El sensor solar propuesto contiene dos detectores de imagen mutuamente perpendiculares (Aunque por razones económicas solamente se desarrolló un solo eje). Esta disposición permite obtener dos ángulos, lo que representa una ventaja en la determinación de la orientación del satélite, que está apoyada por otra serie de sensores, como se vió en el capítulo I. La forma general del sensor de Sol se esquematiza en la [figura 3.1](#).

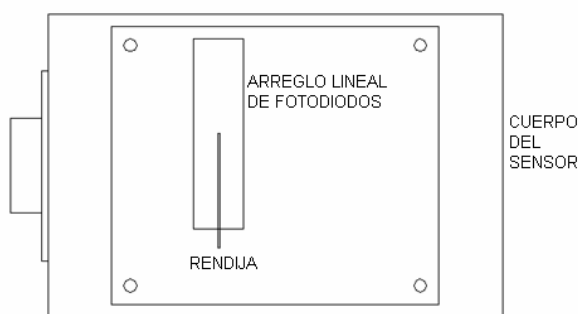


Figura 3.1. Esquema del sensor solar seleccionado.

3.1.1. Principio de funcionamiento del sensor solar

En la [figura 3.2](#) se muestra lo que ocurre cuando los rayos del sol inciden sobre el detector con un ángulo de inclinación de cero grados, iluminando una parte del arreglo lineal de fotodiodos, en este caso específico los elementos del 0 al 128.

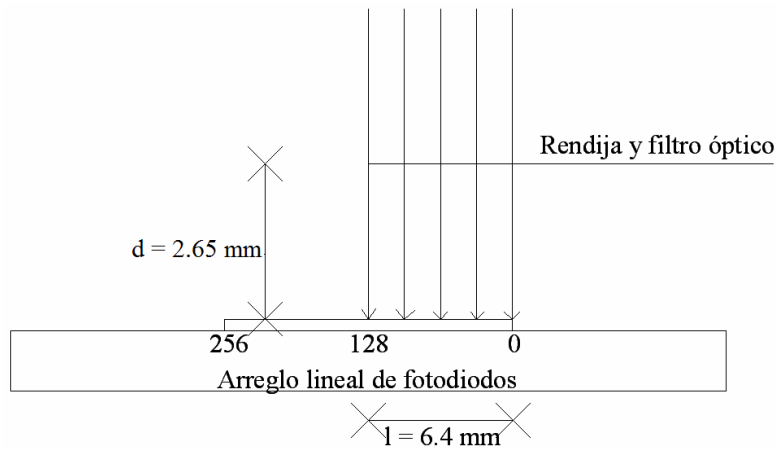


Figura 3.2. Incidencia de los rayos solares con un ángulo de inclinación de 0° .

En la figura 3.3 se muestra como los rayos del sol inciden sobre el detector cuando hay una inclinación de $+22.5^\circ$. En este caso todos los elementos se encuentran iluminados. El ángulo β , determinado por las características geométricas del arreglo, proporciona el campo de visión máximo alcanzado por nuestro sensor. Aún cuando se puede lograr un campo de visión mayor, en la práctica el mejor intervalo fue elegido con $d = 2.65$ mm. En éste caso en sentido positivo de la inclinación tenemos que:

$$\tan \beta = 2.65/6.4 \approx 0.4140625$$

por lo que: $\beta = 22.49^\circ \approx 22.5^\circ$

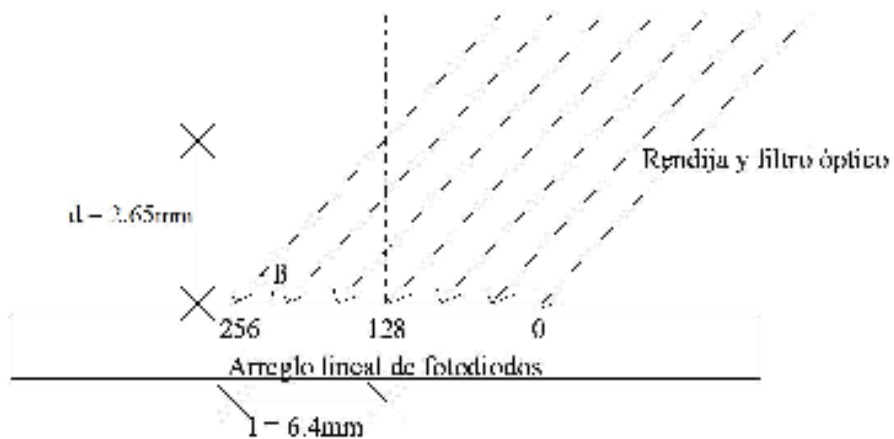


Figura 3.3. Todos los elementos de imagen son iluminados cuando se tiene un ángulo de inclinación de $+22.5^\circ$.

De la misma forma, cuando los rayos del sol se encuentran iluminando en el otro sentido (en el lado negativo), se forma también el ángulo $\beta \approx -22.5^\circ$ aproximadamente. Esto se puede ver gráficamente en la figura 3.4.

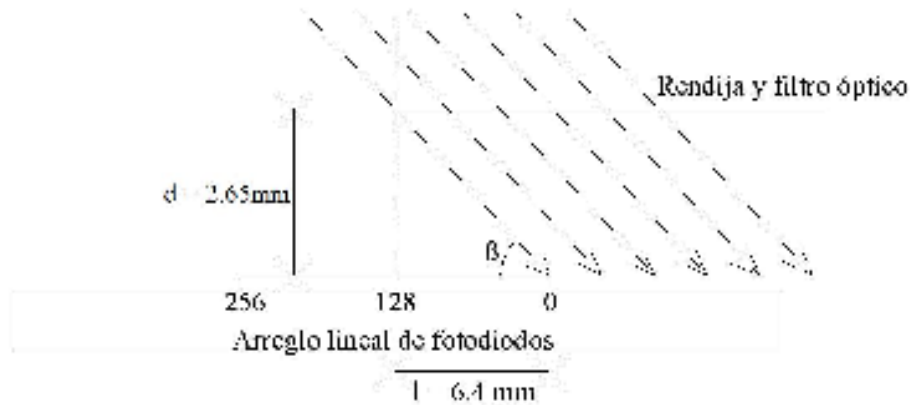


Figura 3.4 Con un ángulo de incidencia de -22.5° no se encuentra iluminado ningún pixel del arreglo.

El cuerpo del sensor tiene 72 [mm] de largo por 48 [mm] de ancho, mientras que la altura total, incluyendo el espesor del filtro óptico, es de 26 [mm]. El diseño mecánico del sensor se muestra en la sección 3.3. La máscara, al igual que todo el cuerpo del sensor, debe ser revestida con un material antirreflejante. Esto es muy importante, porque la luz podría incidir de rebote al arreglo de fotodiodos y deteriorar la calidad de la señal de salida. Toda la superficie interna del sensor será tratada con una solución química de anodizado negro.

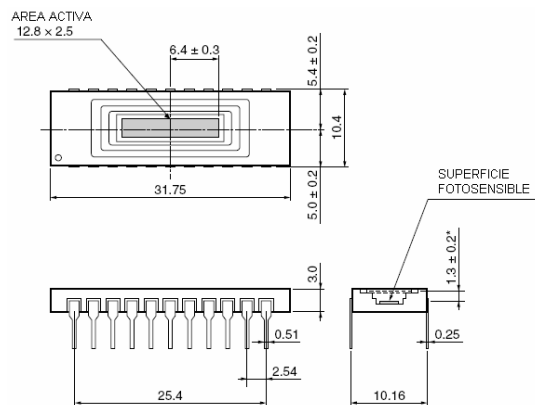


Figura 3.5. Dimensiones del arreglo lineal de fotodiodos S3924-256Q y su circuito de encapsulamiento.

Para poder determinar el vector solar en dos ejes, deben ser colocados en un contenedor dos arreglos idénticos mutuamente perpendiculares. Los arreglos lineales de fotodiodos utilizados, han sido manufacturados por Hamamatsu, y pertenecen al conjunto de dispositivos NMOS Linear Image Sensor de la serie S3924-256Q y sus especificaciones son descritas en la siguiente sección, siendo sus características principales: una gran área activa, número de píxeles 256, altura del píxel 2.5 mm, espaciamento entre los mismos de $50 \mu\text{m}$, alta sensibilidad al ultravioleta con buena estabilidad, baja corriente

oscura y alta saturación, bajo voltaje de operación y bajo consumo de energía, pulso de inicio, pulso de reloj y línea de video, excelente linealidad en la lectura de salida y sensibilidad espacial uniforme.

Tabla 3.1 Especificaciones del circuito S3924-256Q (Ta = 25°C)

Parámetro	Símbolo	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Espaciamiento entre píxeles	-	-	25	-	μm
Altura del píxel	-	-	2.5	-	mm
Intervalo de respuesta espectral	λ	400	-	850	nm
Sensibilidad de longitud de onda	λ_p	-	600	-	nm
Corriente oscura del fotodiodo ^{*3}	I_D	-	0.1	0.3	pA
Capacitancia del fotodiodo ^{*3}	Cph	-	10	-	pF
Exposición de saturación ^{*3*4}	Esat	-	220	-	m/xs
Carga de saturación ^{*3}	Qsat	-	25	-	pC
Voltaje de saturación de salida ^{*3}	Vsat	-	1050	-	mV
Foto respuesta no uniforme	PRNU	-	-	± 3	%

*3: Reset V= 2.5 v, Vdd= 5.0 v, Vφ= 5.0 v

*4: 2856 k, lámpara de tungsteno

Tabla 3.2 Valores máximos absolutos del circuito S3924-256Q

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Suministro de voltaje	Vdd	15	[V]
Voltaje de pulso de entrada (φ1,φ2φst)	Vφ	15	[V]
Consumo de potencia ^{*1}	P	10	[mW]
Temperatura de operación ^{*2}	Topr	-40 a +65	°C
Temperatura de almacenamiento	Tstg	40 a +85	°C

*1: Vdd=5 v, Vr=2.5 v

*2: No condensada

3.1.2. Características electrónicas del arreglo de fotodiodos.

Los avances en arreglos lineales de fotodiodos para la detección de posición hacen posible la implementación del presente sensor solar en dos ejes a un costo relativamente bajo. El sensor descrito, tiene una precisión aproximada de 0.2° . Las principales ventajas de nuestro sensor analógico son sus dimensiones y masa reducida (aproximadamente 120 gramos). El sensor está constituido por un circuito de autobarrido (fabricado con transistores MOS), el propio arreglo de fotodiodos y un conjunto de transistores que direccionan cada uno de los fotodiodos, todo integrado en una pastilla de silicón. El circuito de transistores MOS requiere de muy poca potencia para operar. Un pulso de inicio y dos pulsos de reloj, proporcionan a su vez, un tren de pulsos que genera una dirección que enciende secuencialmente los fotodiodos.

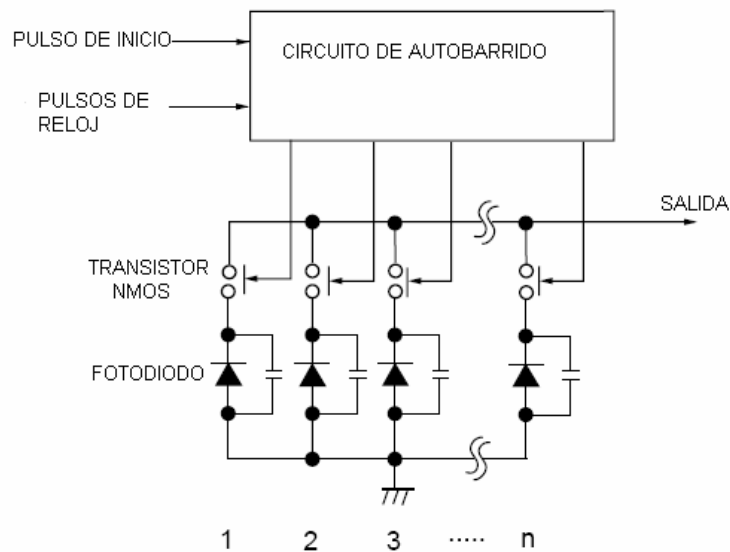


Figura 3.6. Circuito equivalente del sensor.

Para generar los pulsos de reloj, fue necesario utilizar circuitos adicionales. Estas señales son proporcionadas por un temporizador NE556, y por un amplificador operacional trabajando en modo de inversor. Las características principales del pulso de reloj 1 se observan en la [figura 3.7](#).

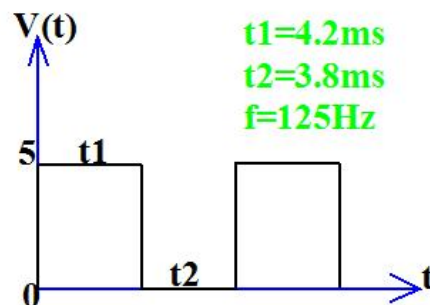


Figura 3.7. Pulso de reloj 1.

Con el amplificador operacional en modo inversor obtenemos el pulso de reloj 2, el cual se observa en la [figura 3.8](#). Para el pulso de inicio se utilizó una de las salidas del propio sensor (EOS), la cual genera un pulso inmediatamente después de que el último píxel es leído.

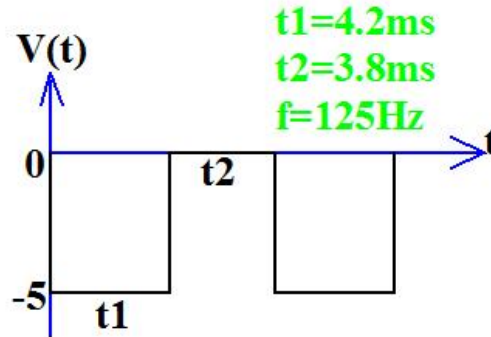


Figura 3.8. Pulso de reloj 2.

Cada dirección generada se puede visualizar como un transistor NMOS, donde el fotodiodo es la fuente, la línea de video es el drenaje y el pulso de autobarrido es la compuerta, como se aprecia en la [figura 3.6](#).

Si la intensidad de luz incidente es mayor al nivel de la carga de saturación, la señal de carga en exceso a ésta última no podrá acumularse en el fotodiodo, por lo que fluirá a través de la línea de video degradando la señal de salida. Para evitar este problema y mantener lo más pura posible la señal de salida, es necesario aplicar el mismo voltaje que se aplica en *Reset V* en la pata *Vscd* (voltaje en el drenaje del transistor MOS) además de poner a tierra la pata *Vscg* (voltaje en la compuerta del transistor MOS).

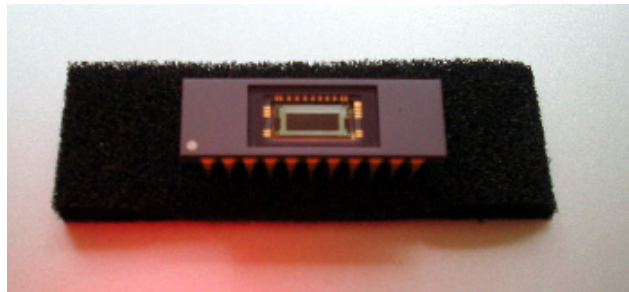


Figura 3.9. Arreglo lineal de 256 fotodiodos Hamamatsu S3924-256Q. Sus dimensiones son de 38 x 22 x 4 mm.

Las principales características del sensor se presentan a continuación ([Technical Information SD-26 \(2006\)](#)):

- Sensores lineales de imagen NMOS (arreglos lineales de fotodiodos de autobarrido, diseñados específicamente como detectores para espectroscopía multicanal).

- Requiere de un pulso inicial ϕ_{st} , el cual enciende el interruptor direccionador (Transistor NMOS) para iniciar la secuencia de salida. El tiempo de integración es el intervalo en que ocurren dos pulsos ϕ_{st} consecutivos. Para obtenerlo hay que multiplicar el inverso de la frecuencia a la que estemos trabajando (8ms) por el número de pixeles del sensor (256). Por lo tanto, en este caso son 2 segundos.
- A diferencia de la mayoría de los arreglos con fotodiodos que proporcionan sus datos en tiempo real, el sensor empleado obtiene la información a través de un sistema de integración, es decir el arreglo de fotodiodos al ser expuesto a la luz, va guardando temporalmente la información en forma de campo eléctrico en la capacitancia formada en las uniones de cada uno de los fotodiodos. Posteriormente la señal es obtenida de forma secuencial con la ayuda de un conmutador de direccionamiento conectado a cada uno de los fotodiodos. Por lo tanto, la salida del sensor es proporcional al producto de la intensidad de luz por el tiempo de integración.
- Número de pixeles: 256.
- Ventana de cuarzo, colocado encima de los pixeles con el propósito de proteger a éstos contra la radiación existente en el espacio.
- Amplia cobertura: ángulo de cobertura de 45° (+/- 22.5°).
- Bajo peso: aproximadamente **120 gramos** (Considerando la electrónica de acondicionamiento).
- Bajo consumo de potencia: aproximadamente 10 mW.
- La luz reflejada desde la Tierra, no afecta la precisión de nuestro sensor, ya que éste cuenta con un filtro que atenúa la intensidad del Sol, esto hace que la Luna y la Tierra sean indetectables.
- La degradación gradual de la sensibilidad del arreglo de fotodiodos no influye en la precisión.
- Comunicación serial con el CPU.

3.1.3 Circuito de acondicionamiento de señales.

La mayoría de los sensores y transductores generan señales que deben ser acondicionadas antes de poder ser utilizadas. Difícilmente un diseñador conecta un transductor directamente a la parte de procesamiento o de despliegue de un sistema, ya que la señal que nos envía un transductor por lo general es muy débil o contiene ruido y componentes que no deseamos, por eso debemos realizar etapas de acondicionamiento de señales.

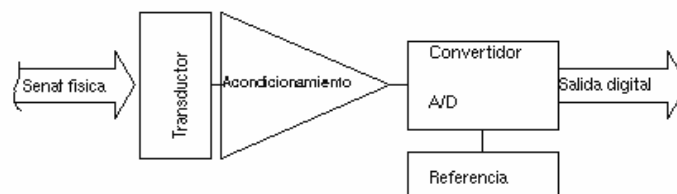


Figura 3.10. Esquema general de un proceso de acondicionamiento de señales.

El acondicionamiento de la señal incluye funciones como amplificación, filtrado y aislamiento eléctrico, entre otros (Acondicionamiento de señales 2007). Por lo general las señales que recibimos de un transductor deben ser amplificadas a gran escala y no pueden pasar mucha corriente para este fin, por eso se utilizan los amplificadores operacionales, ya que tienen las siguientes características:

- Alta impedancia de entrada (del orden de cientos de M Ω).
- Baja impedancia de salida (debajo de 1 Ω).
- Buen rango de frecuencias de operación.
- Baja sensibilidad a las variaciones de la fuente de alimentación.
- Gran estabilidad al cambio de temperatura en el ambiente.

Para obtener la señal de salida del arreglo lineal de fotodiodos, se ha utilizado un circuito como se muestra en la figura 3.11, con los pulsos de inicio y de reloj enviados a los pines ϕ st, ϕ 1 y ϕ 2 que son generados por los circuitos mencionados anteriormente.

Para acondicionar la señal *active video* que entrega el arreglo lineal de fotodiodos, se ha implementado un circuito como el que se muestra en la figura 3.11. La salida del amplificador operacional proporciona una señal cuadrada, que ha sido invertida y ajustada a un nivel adecuado de DC (ver figura 3.12). La ganancia del circuito de amplificación está dada por la relación $G=R_f/R_s$. Para prevenir que haya carga en el arreglo de transistores NMOS, se requiere que R_s sea por lo menos de 10 k Ω . Para cancelar el nivel de DC (*Offset*), se debe ajustar el valor de la resistencia variable colocada en la entrada no inversora del amplificador operacional.

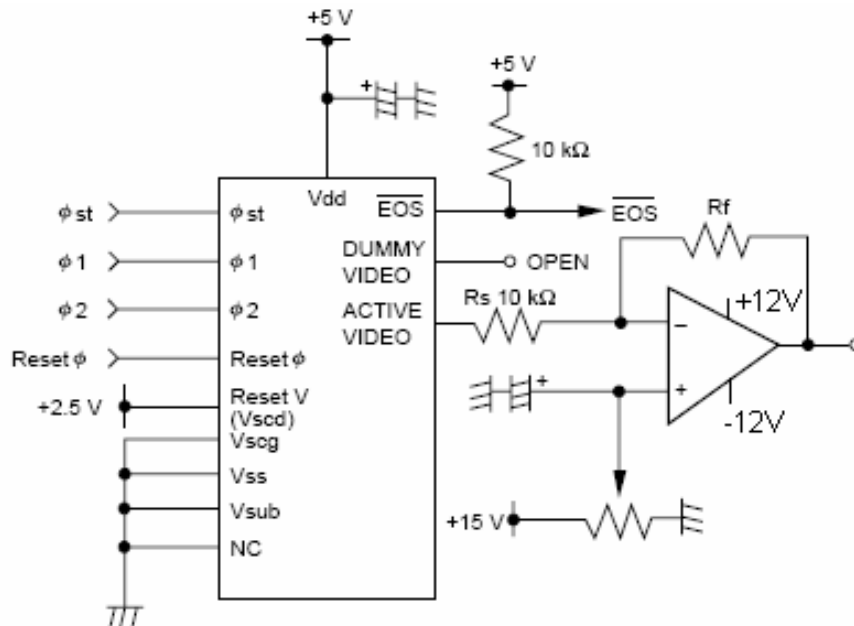


Figura 3.11. Circuito para obtener la salida del sensor

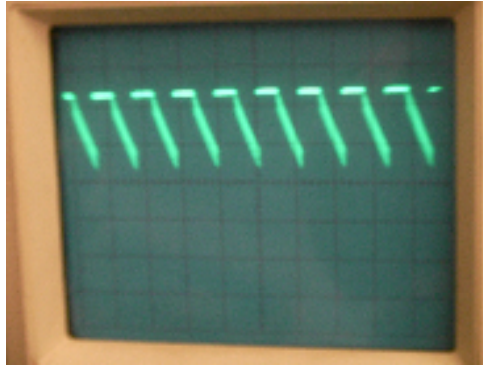


Figura 3.12. Señal a la salida del arreglo de fotodiodos. Tiene 100mV de amplitud y una frecuencia de 125 Hz.

Como se mencionó anteriormente, el arreglo de fotodiodos utiliza un método de integración en el cual la información almacenada en cada uno de los elementos es obtenida secuencialmente, por tanto, no es necesario tener un circuito de acondicionamiento para cada fotodiodo, lo cual significa que el circuito para obtener la lectura del sensor es muy simple.

También se utilizó un circuito rectificador de media onda para obtener en la salida una señal en corriente directa y facilitar la interpretación de los datos. Este se muestra en la [figura 3.13](#).

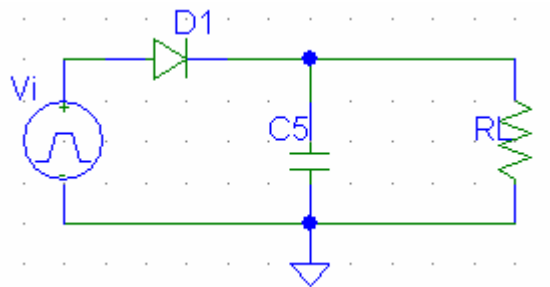


Figura 3.13. Circuito rectificador de media onda.

La tensión de salida del rectificador de media onda mostrado en la figura anterior, no muestra con claridad un voltaje en corriente continua que se pueda aprovechar (no es constante). Pero si incluimos a la salida de éste y antes de la resistencia de carga, un capacitor, este ayudará a aplanar la salida.

Cuando el diodo conduce (semiciclo positivo) el capacitor se carga al valor pico del voltaje de entrada. En el siguiente semiciclo, cuando el diodo está polarizado en inversa y no hay flujo de corriente hacia la carga, es el condensador el que entrega corriente a la salida (el condensador se descarga a través de la resistencia de carga) ([Electrónica Unicrom 2008](#)).

En la [figura 3.14](#) se muestra el circuito completo del sensor de sol, incluyendo el arreglo lineal, los generadores de pulsos y el circuito de acondicionamiento de señales. En la [siguiente sección](#) se describe el diseño de una tarjeta impresa para alojar a todos estos componentes.

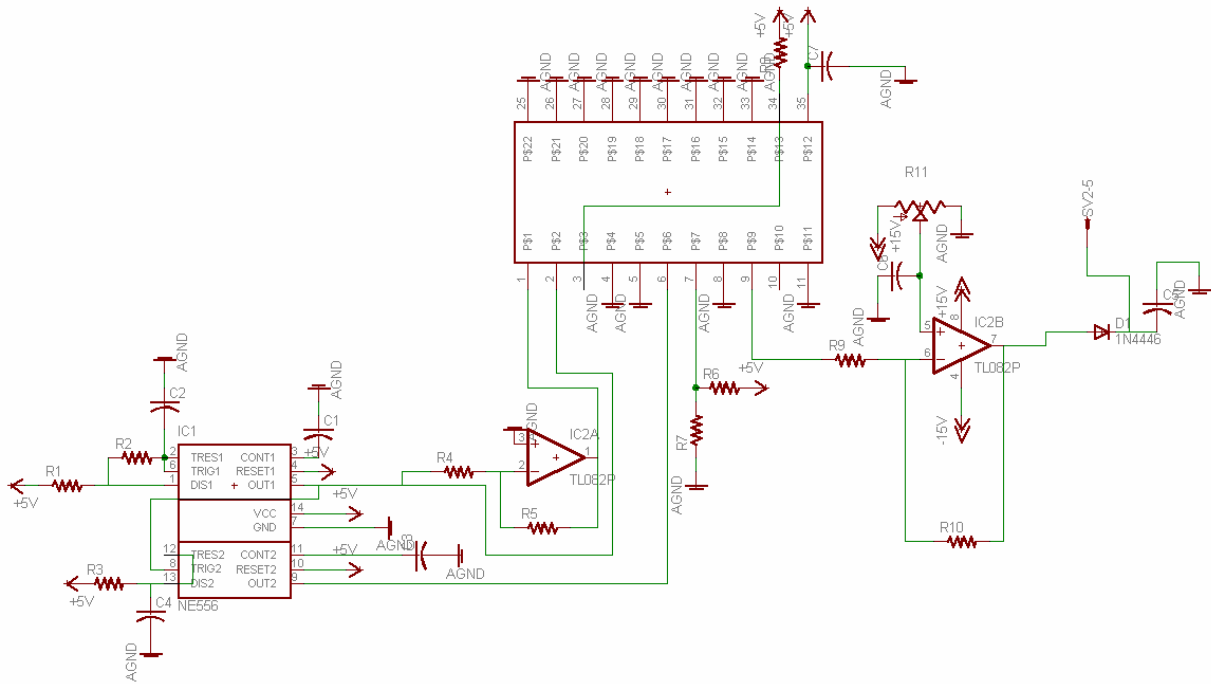


Figura 3.14. Circuito completo del sensor de Sol, que incluye arreglo lineal de fotodiodos, amplificador, rectificador de media onda y generadores de señales de reloj.

3.2. Diseño del circuito impreso.

Con la finalidad de evitar ruido en la circuitería y por ende, señales indeseables o poco confiables para el sensor de Sol, se ha diseñado y construido un circuito impreso, para ello se ha recurrido a la ayuda de un programa llamado *Eagle™ (Layout Editor)*. Dicho circuito impreso, fue diseñado a doble cara y se trató de minimizar lo más posible en sus dimensiones debido a la aplicación espacial para la que se espera sea utilizado. Una característica importante a tomar en cuenta fue la poca corriente (6.7 mA) con la que trabaja el sensor, por lo cual las pistas se diseñaron con un ancho de solamente 0.8mm.

En la [figura 3.15](#) pueden observarse las dos caras del circuito impreso. Las dimensiones finales de la tarjeta son de 80 x70 mm. Se tienen 4 entradas de polarización con valor de 12, -12, 5 y 0V y una salida analógica de la señal que entrega el sensor y que será direccionada hacia un convertidor analógico digital y de ahí a la computadora de a bordo del satélite para efectuar la operación de detección de orientación, junto con los demás sensores.

La asignación de pines del conector DB9 es la siguiente:

- Pin 1 salida analógica
- Pin 2 +5V
- Pin 3 -12V
- Pin 4 GND
- Pin 5 +12V
- Pin 6,7,8,9 NC

En la [figura 3.15](#) se muestra el diseño definitivo de la tarjeta impresa por ambas caras, mientras que en la [figura 3.16](#) se aprecia la capa correspondiente a los componentes y una fotografía de la tarjeta terminada y colocada en su caja.

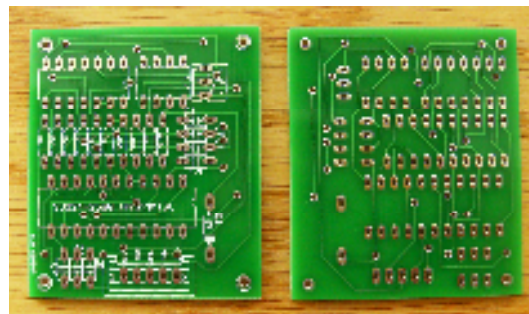
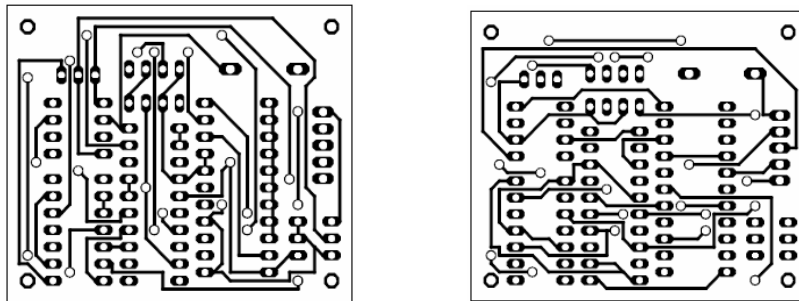


Figura 3.15. Ambas caras del circuito impreso del Sensor de Sol y fotografías del mismo.

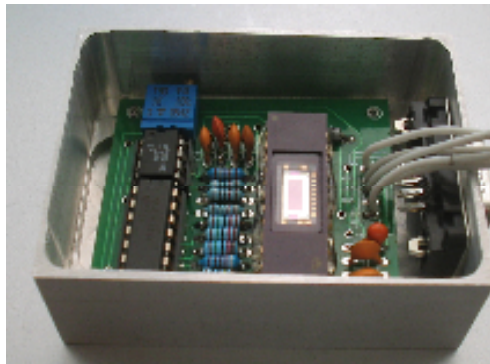
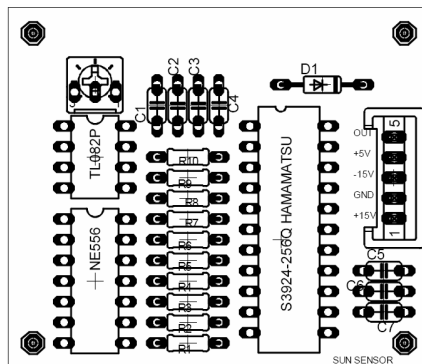


Figura 3.16. Capa del circuito impreso donde se muestra el acomodo de los componentes utilizados y tarjeta terminada en su contenedor metálico.

3.3.1. Lista de componentes electrónicos.

La lista de componentes y valores empleados en el circuito del sensor de Sol se muestra en la [Tabla 3.3](#).

Tabla 3.3. Lista de componentes del sensor de Sol.

Resistor	Valor [kΩ]	Capacitores	Valor [nF]	Circuitos Integrados	Tipo	Semiconductores	Tipo
R1	100	C1	10	C1	NE556	S1	S3924-256
R2	1000	C2	5.5	C2	TL082	D1	1N4001
R3	9.3	C3	10				
R4	15	C4	1				
R5	15	C5	470				
R6	15	C6	10				
R7	10	C7	10				
R8	10						
R9	10						
R10	180						
R11	1						

3.3. Diseño mecánico del sensor.

El sensor de Sol está diseñado para soportar las condiciones ambientales del espacio, por esta razón, se construyó con aluminio aeroespacial de la serie 6061 y aunque tiene un tratamiento térmico para evitar la oxidación superficial (T350), se le dará un acabado anodizado negro, que tiene la doble función de evitar reflejos espurios en su interior y lograr una resistencia contra la corrosión causada por el oxígeno monoatómico presente en órbita baja Terrestre. El método de fabricación se llevó a cabo mediante un proceso de desbaste de un bloque macizo con una fresadora. La parte mecánica del sensor de sol, está compuesta por un chasis monobloque que da cabida a la tarjeta de la electrónica, donde tiene acomodo el detector de arreglos de fotodiodos, y la tapa, donde se encuentra una rendija de abertura variable, en caso de que sea necesario hacer algún ajuste. Sobre la tapa se encuentra adherido el filtro óptico de densidad neutra.

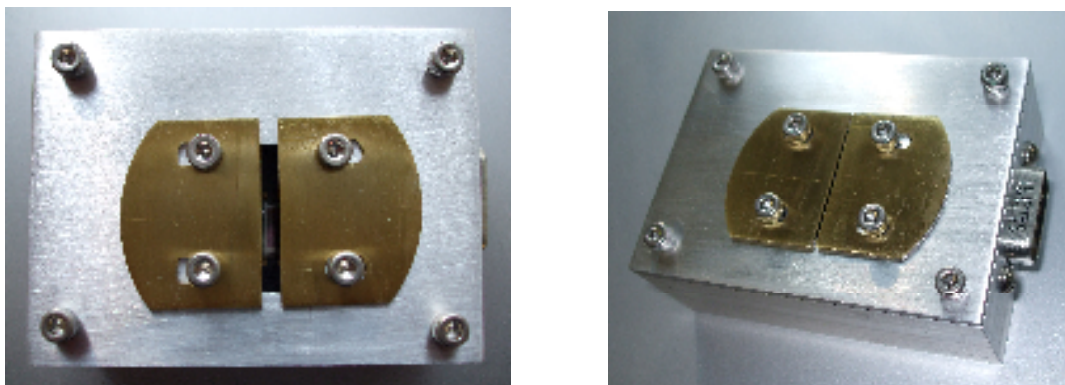


Figura 3.17. Los componentes mecánicos principales del sensor de Sol los constituyen una caja o chasis y una tapa. En esta última se encuentra una abertura rectangular por donde pasa la luz y una rendija de apertura variable que completa el juego de elementos mecánicos de este dispositivo.

En la figura anterior se observa que en la tapa superior se encuentra la máscara, o pantalla, de forma rectangular, que tiene una dimensión de 18 x 8 mm, sobre ésta se encuentra el filtro, que a su vez está a 2.65 mm por encima de la superficie de la ventana de cuarzo del detector y la luz que pasa a través de ella permite determinar si el Sol se encuentra exactamente en la vertical, o si existe alguna desviación en este eje de referencia del satélite. Su altura total es de 26 mm, por lo que su diseño permite tener caras muy delgadas (1.5 mm). Tiene una masa de 70 g, sin incluir la electrónica, por lo que no se espera que pueda causar problemas de exceso de masa en el satélite, sin embargo, en caso de un nanosatélite sería necesario integrar el sensor en una tarjeta y hacer una ranura en el cuerpo del satélite, para poder cumplir con el requisito de masa mínima de este tipo de artefactos.

3.3.1. Determinación de las dimensiones definitivas.

El acomodo de los arreglos de fotodiodos para el sensor de Sol, como se mencionó anteriormente, tiene forma de "L". Sin embargo, en este primer diseño sólo se consideró un solo arreglo lineal de fotodiodos, por razones presupuestales, el cual ya montado en el circuito impreso con su electrónica de acondicionamiento y los osciladores que generan los pulsos de reloj, tiene una dimensión de 52 x 44 mm.

El chasis de aluminio del sensor en forma de prisma rectangular, tiene de largo 72 mm por 48 mm de ancho, mientras que la altura es de 22 mm. Como podemos observar en las figuras 3.17 y 3.18, el diseño mecánico para un solo arreglo de fotodiodos es relativamente sencillo. Se ha utilizado un conector DB9 para enviar y recibir señales de polarización y de respuesta del sensor.

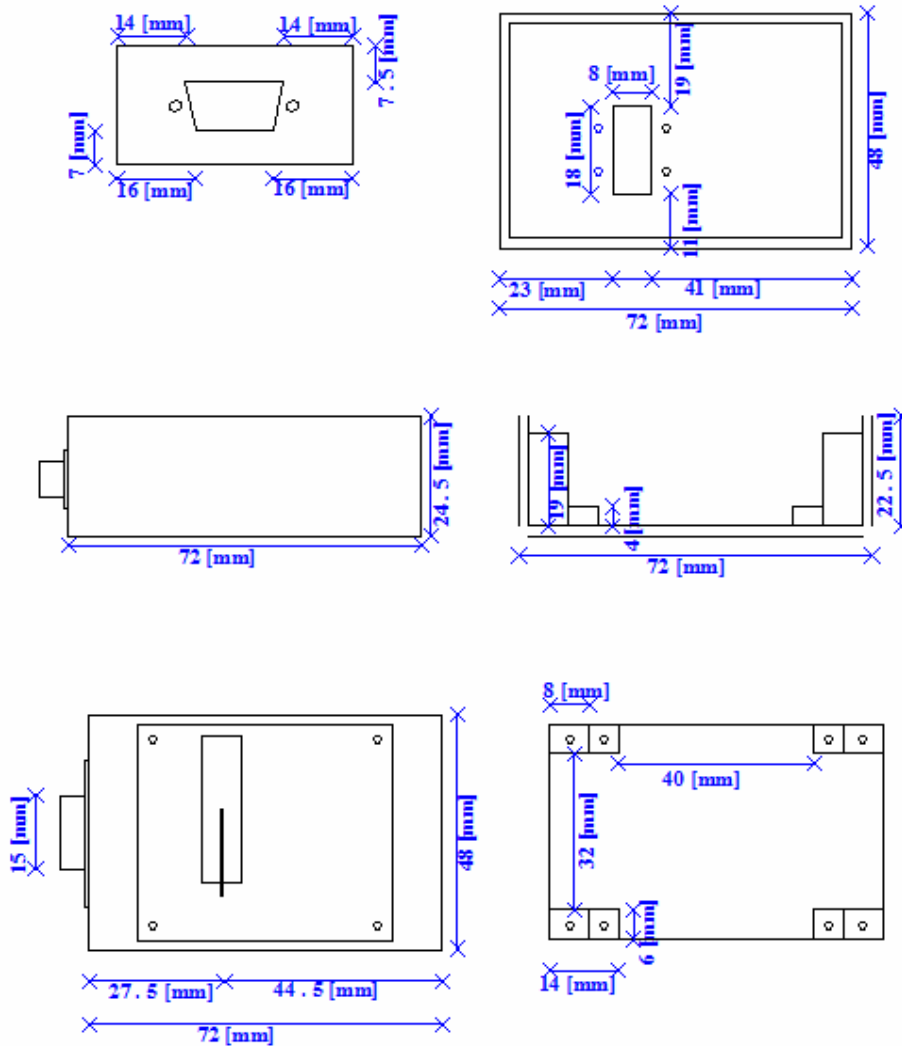


Figura 3.18. Dimensiones finales y diseño mecánico del Sensor de Sol.

3.4 Pruebas de funcionamiento.

Una vez armados los circuitos generadores de pulsos, junto con el amplificador operacional, se procedió a determinar la respuesta del circuito. Para poder caracterizar de una manera adecuada el comportamiento del sensor, ante diferentes condiciones de altura de la máscara, ancho de la ranura y de potencia de iluminación, fue necesario realizar varios experimentos para obtener distintas curvas de salida.

Se utilizó una lámpara para simular la emisión solar, este dispositivo fue muy útil en la primera etapa de pruebas, ya que permitió determinar y fijar en un intervalo más cerrado, los parámetros más importantes del sensor de Sol. En la figura 3.19 se muestra el arreglo utilizado para este propósito. En el capítulo cuatro se explica de manera más amplia, el arreglo final de componentes que fue utilizado para calibrar, llevar a cabo las pruebas finales del circuito y obtener las curvas de respuesta definitivas.



Figura 3.19. Arreglo que permitió llevar a cabo las pruebas de funcionamiento del sensor de sol.

4

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE SOL

En este capítulo se hace una reseña de las pruebas que fueron necesarias para determinar que el funcionamiento del sensor de sol era el adecuado, así como establecer y acotar los parámetros más importantes.

Una brújula digital, equipada con inclinómetros, fue utilizada como referencia de orientación, un medidor de intensidad luminosa que entrega lecturas directamente en W/m^2 y una lámpara de halógeno conectada a una fuente de voltaje regulada, permitieron llevar a cabo la calibración de este dispositivo.

4.1. Curvas de respuesta.

Para realizar las pruebas se adaptó un mecanismo para conformar un banco de trabajo, el cual se muestra en [la figura 4.1](#). Un disco metálico graduado, fue utilizado como medidor de desplazamientos angulares y fue dividido por secciones para obtener diferentes grados de inclinación y facilitar los ensayos.

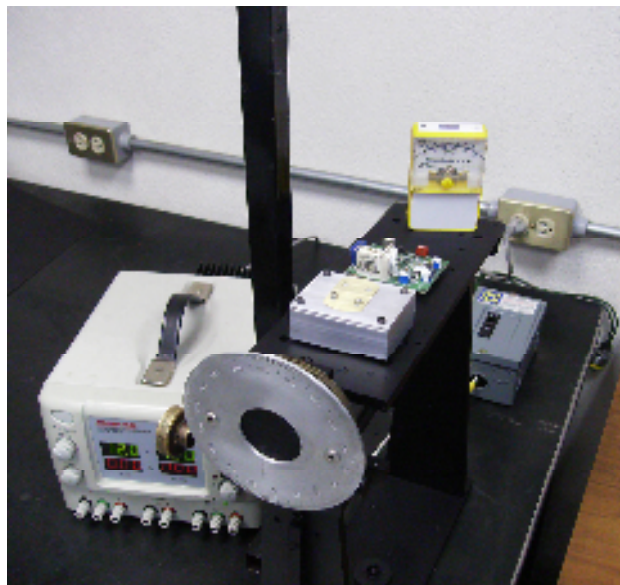


Figura 4.1. Aparato de inclinación para pruebas de respuesta del sensor. Arreglo implementado para llevar a cabo las pruebas iniciales de funcionamiento del sensor acoplado a su electrónica de acondicionamiento.

El indicador circular de grados del dispositivo de inclinación, fue dividido en ocho partes iguales, desde 0° hasta 22.5°, y de forma simétrica desde el 0° hasta -22.5°. Esto para facilitar los experimentos y tener un número entero de pixeles iluminados en cada posición. La relación de ángulo de inclinación y el número de pixeles iluminados se muestra en la [tabla 4.1](#).

Tabla 4.1 Número de pixeles iluminados de acuerdo con la inclinación.

Ángulo de inclinación [°]	Pixeles iluminados
22.5	256
19.7	240
16.9	224
14.01	208
11.3	192
8.4	176
5.6	160
2.8	144
0	128
-2.8	112
-5.6	96
-8.4	80
-11.3	64
-14.01	48
-16.9	32
-19.7	16
-22.5	0

La función para obtener las curvas de respuesta está dada por la variable independiente ángulo de inclinación, y por la variable dependiente voltaje de salida en DC, sin embargo, para obtener este voltaje de salida en un intervalo deseado para simplificar la conversión analógica-digital, fue necesario obtener y fijar los valores de otras variables.

Por tanto, se obtuvieron diferentes curvas de respuesta; variando la altura de la máscara donde se encuentra la ranura delgada, el ancho de la propia ranura y cambiando también la ganancia del amplificador operacional del circuito de acondicionamiento.

En la [figura 4.2](#) se muestra la respuesta obtenida haciendo variar la altura de la máscara de 1 a 6 mm, manteniendo una ganancia de 47.5 y aplicando una potencia lumínica al sensor, de 250 W/m². El ancho de la ranura es de 0.5 mm.

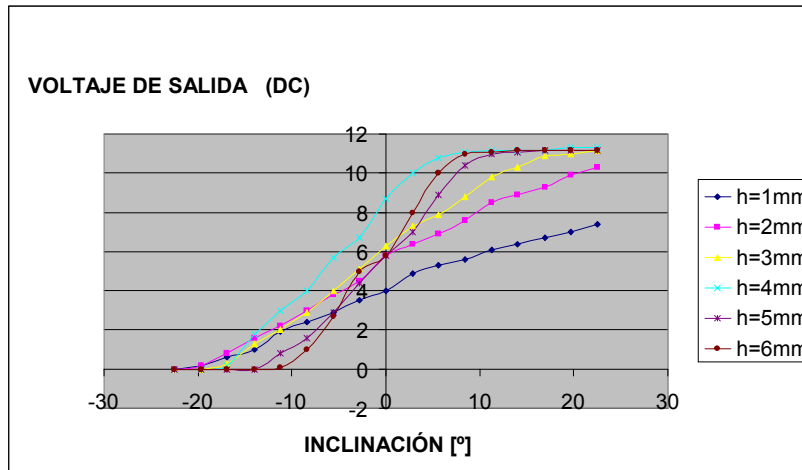


Figura 4.2. Curvas de respuesta con una ganancia de 47.5.

En la figura 4.3 se muestra la respuesta ante el cambio de ganancia, estableciéndose en 18. Esta modificación provocó que las señales de salida presentaran una respuesta más lineal. La altura de la máscara varió de 1 a 6 mm y la potencia se mantuvo en 250 W/m^2 . El grosor de la ranura fue de 0.5 mm.

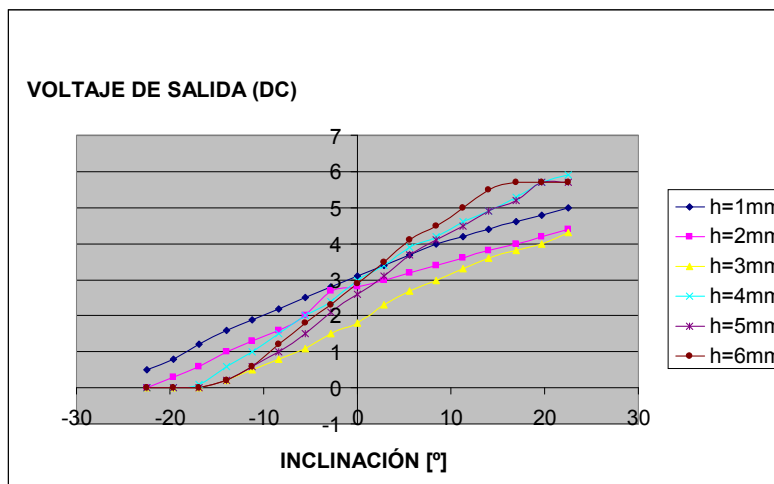


Figura 4.3. Curvas de respuesta con una ganancia de 18.

Las gráficas de la figura 4.4, muestran que al disminuir demasiado la ganancia del circuito la respuesta vuelve a perder linealidad. Para esta serie de pruebas, las demás variables se mantuvieron sin modificación. La ranura se estableció en 0.25 mm.

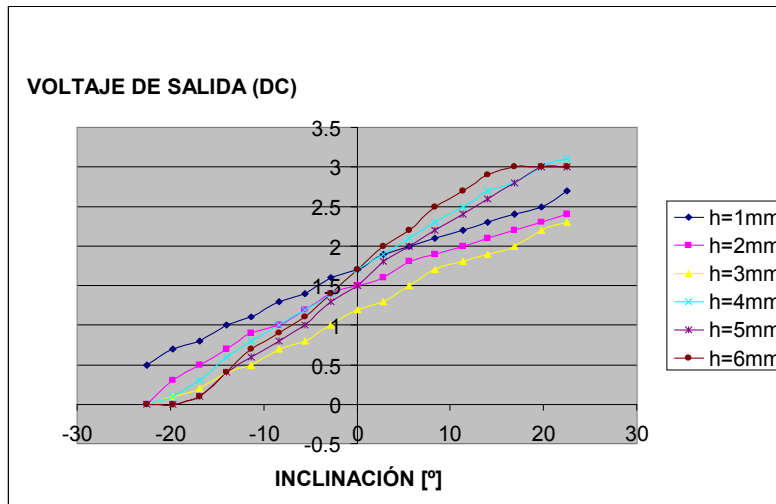


Figura 4.4. Curvas de respuesta con una ganancia de 8.6.

En la serie de curvas de la figura 4.5, se aprecia una respuesta más uniforme, aunque la linealidad se ha perdido. La rendija en este caso tuvo una abertura de 0.25 mm

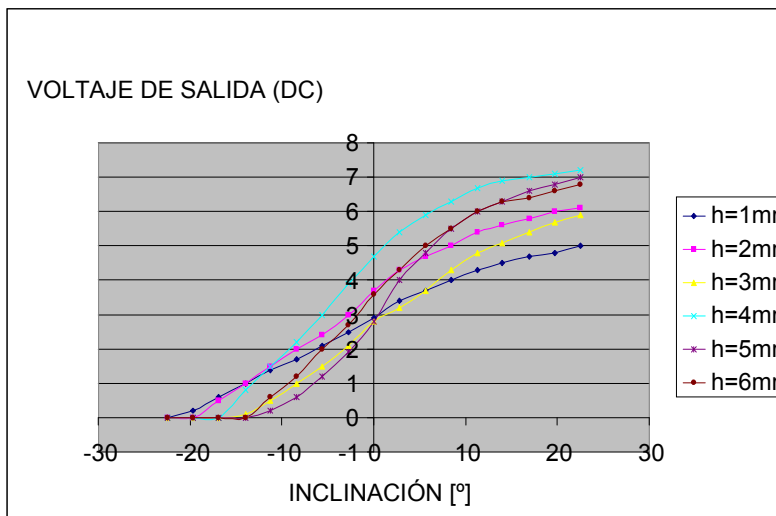


Figura 4.5. Curvas de respuesta con una ganancia de 8.6 y una potencia de 250 W/m²

Para obtener las gráficas de la figura 4.6, se colocó un valor de ganancia de 18, pero se hizo una modificación muy importante, ya que se utilizó el propio Sol como fuente de iluminación. Esto se hizo con el propósito de validar la utilización del sensor en condiciones reales y establecer la posible existencia de alguna dificultad. Se encontró que la respuesta es muy parecida a la obtenida en el laboratorio. La rendija tuvo en este caso un claro de 0.15 mm.

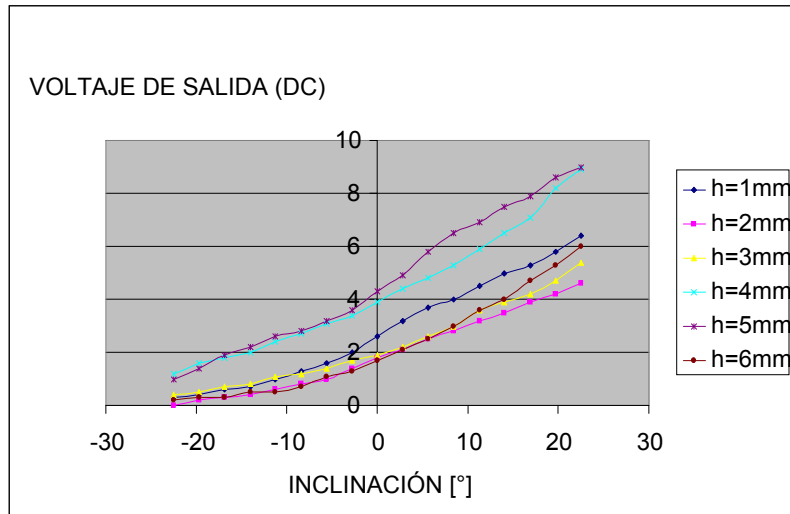


Figura 4.6. Curvas de respuesta con una ganancia de 18 y una potencia de 650 W/m^2 tomada del propio Sol.

De toda la serie de ensayos y gráficas obtenidas, se puede observar que una ganancia más adecuada es: $G=18$, ya que las curvas que tienen este valor caen dentro del intervalo deseado (0-5V) para propósitos de conversión analógico/digital en la computadora de abordo. También se observa que la mejor respuesta se logra con la máscara a una altura de 2.5 mm, con un espesor para la ranura de 0.15mm.

La última gráfica obtenida a ($G=18$ y 650W/m^2) se realizó utilizando los rayos del Sol, con lo cual se obtuvo una mejor aproximación a la realidad. Un posible problema se vislumbró debido a la cercanía de la fuente de iluminación en pruebas de laboratorio, en comparación con las características del Sol; que puede considerarse una fuente puntual, por encontrarse a gran distancia de la Tierra. Otro posible problema era la respuesta del sensor ante la emisión espectral de la fuente de iluminación. Estas pruebas demostraron que las respuestas fueron semejantes, sin embargo, algunos arreglos se hicieron para hacer las pruebas más realistas y esto se describe con más detalle [en la siguiente sección](#).

4.2. Calibración y compensación.

Para poder realizar pruebas de funcionamiento definitivas del sensor de Sol, sería indispensable exponerlo a las condiciones orbitales en que se encontraría durante su operación. Dado que la atmósfera terrestre bloquea una proporción de la radiación total proveniente del Sol, en Tierra solamente es posible calibrar los sensores si se cuenta con una fuente luminosa que emule las características de potencia solar y que tenga un intervalo espectral compatible al del detector basado en fotodiodos (400 a los 850nm). Como no se cuenta con un simulador solar, entonces se hace necesario contar con una estrategia que permita efectuar las pruebas de calibración en Tierra.

Un simulador solar es un dispositivo que nos proporciona una fuente de luz cuyas características son muy semejantes a las que emite el propio Sol. Hay simuladores que emiten de manera continua o en forma pulsante. Son de gran utilidad para probar la eficiencia de las celdas solares, revestimientos ópticos, térmicos, pinturas, etc. Como fuente luminosa estos equipos utilizan una lámpara de xenón de 3 kW. Un mecanismo elevador maneja el ajuste del ancho del haz de luz de salida, que comúnmente es de 33 cm y tiene formas variadas. Nos proporciona una intensidad que puede variar entre 0.23 a 2 constantes solares y tiene un espectro de emisión entre 0.25 y 2.7 micras (Ruiz 2003).

4.2.1. Arreglo experimental.

El arreglo lineal de fotodiodos tal como sale de la fundición ha sido colocado cuidadosamente alineado sobre el chip utilizado, con lo cual se obtiene una alta exactitud en la medición del ángulo. Sin embargo, debido a factores como la precisión al momento de montar el chip en la tarjeta impresa o ésta sobre el chasis del sensor de sol, existe un cierto error en la información obtenida. La alineación puede presentar una pequeña variación por el cambio en el ángulo de inclinación, o cobertura de la máscara y esta puede ser compensada con la electrónica de acondicionamiento. Aunque una vez en órbita debe tenerse preparado un procedimiento de calibración, no solo para este sensor, sino para todos los utilizados por los subsistema de orientación y control del satélite.

En la figura 4.7 se muestra el arreglo utilizado para llevar a cabo las pruebas de respuesta y calibración del sensor de Sol.



Figura 4.7. Fotografía del arreglo experimental, donde se aprecia el sensor de sol, la lámpara, la brújula y el medidor de potencia lumínica.

4.2.1.1. Fuente de iluminación.

Con la finalidad de llevar a cabo una calibración adecuada del sensor, se ha tratado de exponerlo a una potencia luminosa semejante a la que encontrará en la órbita terrestre, es decir, algo cercano a 1350W/m^2 . Como la atmósfera terrestre bloquea gran cantidad de la radiación proveniente del Sol, no podemos usar al propio Sol como fuente, así que en su lugar hemos utilizado una lámpara incandescente de halógeno de 2000W. Esta nos proporciona la potencia lumínica requerida, colocada a una distancia de 80 cm del sensor. La lámpara utilizada se muestra en la figura 4.8, tiene un intervalo espectral que va de los 380 a los 750nm, lo cual nos acerca razonablemente a una buena calibración, ya que como se vio en el Capítulo 3 y como se muestra en la figura 4.9, el arreglo lineal de fotodiodos utilizado tiene un intervalo de respuesta espectral que va de los 400 a los 850nm.

Para captar la cantidad máxima de energía, el área fotosensible del sensor debe estar frente a la lámpara, perpendicular a la luz incidente, ya que el flujo a través de una superficie es más grande cuando su sentido es normal a la misma.



Figura 4.8. Lámpara de halógeno utilizada para simular la radiación solar.

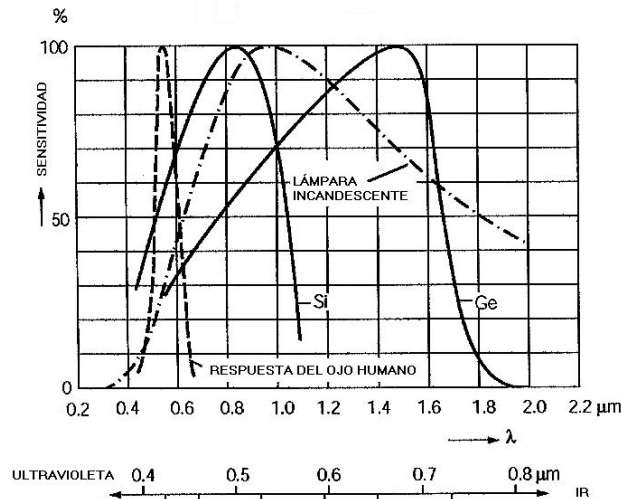


Figura 4.9. En esta gráfica se pueden apreciar diferentes respuestas espectrales: la del ojo humano, la de los diodos de silicio, de germanio y la de una lámpara incandescente.

4.2.1.2. Sistema mecánico de inclinación.

Para variar el ángulo de inclinación con respecto a la fuente de iluminación, se ha usado el dispositivo mecánico, como el que se muestra en la [figura 4.10](#). Este permite un movimiento de $\pm 90^\circ$, más que suficiente para cubrir el intervalo de operación del sensor solar que es de $\pm 22.5^\circ$. Su base móvil, está ajustada a 90° del sistema de engranes para asegurar un movimiento en ejes paralelos a la fuente de iluminación. Las pruebas se efectuaron haciendo girar el mecanismo en un solo sentido para evitar problemas con el *juego* que existe en el acoplamiento entre los engranes.

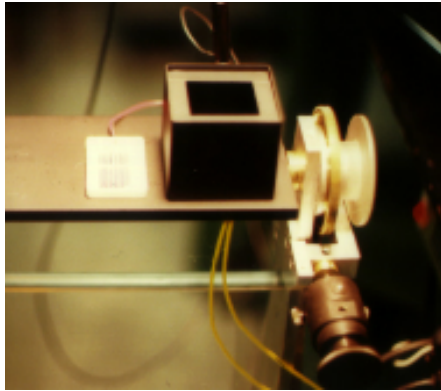


Figura 4.10. Sistema utilizado para producir diferentes inclinaciones con respecto a la fuente luminosa.

4.2.1.3. Medidor de intensidad solar.

La potencia luminosa proporcionada por la lámpara de halógeno ha sido medida con un equipo adaptado con una fotocelda calibrada, proporcionando lecturas directamente en $[W/m^2]$. Este dispositivo nos permitió medir diferentes intensidades y obtener distintas curvas de calibración.



Figura 4.11. Equipo utilizado para la medición de la potencia lumínica, directamente en W/m^2 . En su parte superior cuenta con una celda solar calibrada.

4.2.1.4. Brújula electrónica.

Con el propósito de determinar las tres componentes vectoriales del campo magnético de la Tierra y poder efectuar pruebas de orientación y de control de estabilización utilizando bobinas magnéticas como actuadores, se emplea una brújula electrónica. Este dispositivo ha sido el sensor de orientación más utilizado durante la gran mayoría de las pruebas que se han efectuado para el proyecto de desarrollo de una plataforma para pruebas de algoritmos de orientación para satélites pequeños (Prado J. 2007). Proporciona las señales de: cabeceo, rotación y Norte verdadero, temperatura y las 3 componentes magnéticas (X,Y,Z). Esto es debido a que adicionalmente posee dos inclinómetros que proporcionan la desviación con respecto a la horizontal (ejes de alabeo y cabeceo).

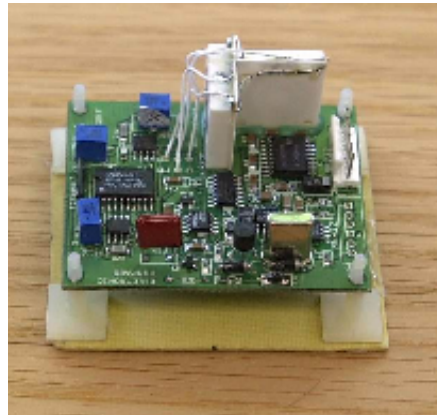


Figura 4.12. Brújula electrónica que consta de un magnetómetro en tres ejes y de dos inclinómetros en los ejes X,Y.

Tabla 4.2. Características principales de la brújula electrónica.

Azimut	0 – 360 grados
Cabeceo	± 70 grados
Alabeo	± 70 grados
Resolución de azimut	12 bits
Resolución de inclinación	12 bits, escala completa, ambos ejes
Precisión de azimut	< 0.5 grados
Repetibilidad de inclinación	< 0.02 grados
Campo magnético	± 2 Gauss, máximo
Resolución magnética	< 1 mGauss
Polarización	5 VCD
Temperatura	-30 a +85 °C
Peso	< 45 gramos
Calibración	EEPROM no volátil
Comunicación	300 – 38400 bauds
Formato de salida	Serial RS232, NMEA-0183, RS-422
Actualización máxima	10.5 veces/seg

Las principales características de la brújula electrónica EZ-COMPASS-3™ son la precisión que entrega y su masa y tamaño reducidos (EZ-Compass 3). En la [tabla 4.2](#) se señalan sus características técnicas. Una ventaja importante de este sensor, es que nos permite hacer una calibración en su respuesta para la medición de las tres componentes magnéticas. Compensa la influencia de anomalías localizadas en su proximidad, lo que permite obtener lecturas corregidas. Este sensor envía datos a una tasa de 10.5 Hz, a través de una interfaz serie RS232.

4.2.1.5. Filtro óptico para atenuación de la radiación solar.

Para evitar la saturación del arreglo lineal de fotodiodos, se utilizó un filtro Kenko™ modelo OP4 ND. Una vez colocado este filtro, fue necesario ajustar la ganancia del amplificador operacional del circuito de acondicionamiento.

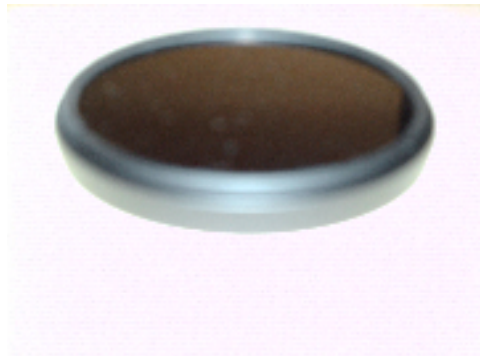


Figura 4.13. Estado original del filtro Kenko™ OP4 ND.

La misión principal del filtro de densidad neutra (ND) es reducir la cantidad de luz que pasa a través de la lente. Por el material con el que están fabricados (vidrio óptico gris neutro de alta calidad), filtran todo el espectro visible, permitiendo la reducción de la intensidad de la luz sin cambiar sus características. Su transmitancia puede ser expresada en porcentaje o de forma decimal. La densidad óptica (OD) siempre se expresa como el negativo del logaritmo de la transmitancia.

$$OD = -\log_{10} T \quad \text{ó} \quad T = 10^{-OD}$$

Por lo que el filtro utilizado (OP4 ND) tiene una transmitancia del 0.01%, lo cual ayuda a que el sensor no se sature con la exposición directa al Sol. Esto hace que la diferencia entre la potencia original que recibiría el detector de 1350 W/m^2 , se vea reducida a 13.5 W/m^2 .

4.2.2. Curvas de respuesta.

En esta sección se muestran las curvas obtenidas en la fase final de pruebas, usando la lámpara de halógeno emulando la radiación solar. La potencia en este caso se mantuvo en 1350 W/m^2 y la abertura de la [rendija en 0.2 mm](#). La distancia de la rendija a la ventana del detector es de 2.65 mm. Lo que se varió fue la ganancia del amplificador

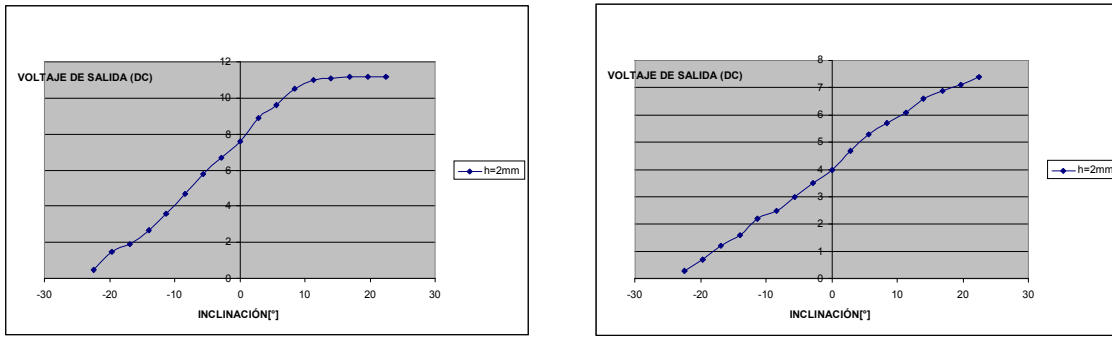


Figura 4.14. Curvas de respuesta con una ganancia de 47.5 y 33, respectivamente.

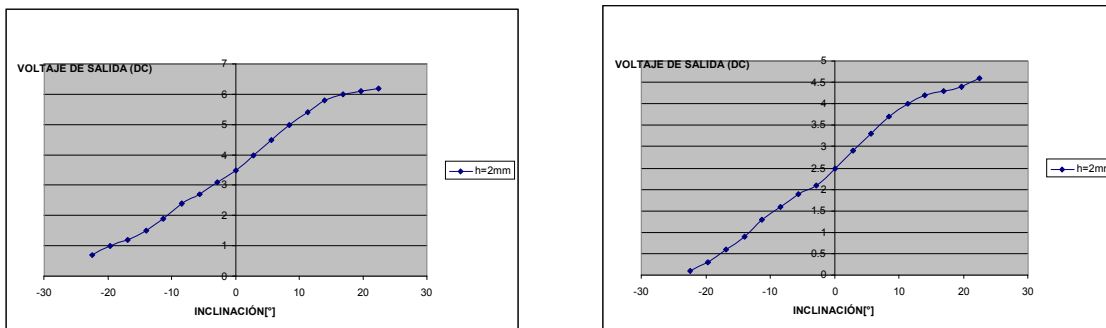


Figura 4.15. Curvas de respuesta con ganancias de 22 y 18, respectivamente.

Se observa que la curva que mejor se aproxima a nuestras necesidades es la de $G=18$, debido a que su voltaje de salida está dentro del intervalo deseado (0-5V), además de que se obtiene una respuesta lineal (Prado J. y Nápoles E. 2008).

Por otro lado para asegurar el correcto funcionamiento del sensor en órbita terrestre, se han utilizado elementos y materiales de uso militar y aeroespacial, tal es el caso del circuito de la serie SE556 para los temporizadores y el aluminio aeroespacial en el cuerpo del sensor.

4.3. Sensores burdos de Sol y los albedos Terrestre y Lunar.

4.3.1. Sensores burdos de Sol.

Es necesario, además del sensor de Sol, contar con un sistema burdo de detección de la orientación del vector solar. El sistema de control necesita conocer el apuntamiento al Sol, aún cuando éste no se encuentre dentro de su campo de visión. Puesto que no es necesario contar con una lectura precisa del apuntamiento para conducir al satélite al campo de visión, es suficiente colocar una celda solar en cada una de sus caras. Esto permite que las celdas solares, en las caras oscuras del satélite, no emitan señal, mientras que las caras iluminadas producen las señales de detección del Sol. Con un algoritmo de control adecuado, puede

calcularse la secuencia y tiempo de activación de los actuadores para llevar al correcto apuntamiento del satélite, al campo de visión del sensor, o a una orientación burda del satélite.

Los detectores en las caras del satélite estarían dispuestos de tal forma que envíen información de presencia o ausencia de luz solar. La única calibración posible en dichas celdas es el punto de corte en la electrónica para la discriminación de albedo producido por otros cuerpos reflejantes de luz, como la Tierra o la Luna.

4.3.2. Albedos terrestre y lunar.

Durante miles de años, sin poder comprender su origen, la Humanidad observó con extrañeza que la Luna en su fase creciente exhibe una pequeña franja iluminada, mientras que el resto del disco lunar desprende un fantasmal resplandor que dibuja su contorno. Fue Leonardo da Vinci quien, fascinado por el brillo nocturno de los océanos, explicó en el siglo XVI la causa de ese enigmático fenómeno: la porción iluminada de la Luna recibe directamente luz del Sol; el débil resplandor en el lado oscuro es el brillo de la Tierra, la luz solar que nuestro planeta refleja ([Meteored 2008](#)).

Albedo es la relación que existe entre la cantidad de luz que incide sobre un cuerpo y la luz que éste refleja. Expresa la capacidad de reflexión de la luz de un cuerpo. La Tierra en promedio refleja el 32% de la luz solar que recibe, mientras que la Luna refleja en promedio el 7.2% de la luz del Sol.

Con el filtro utilizado se garantiza que los albedos terrestre y lunar no influirán significativamente en la respuesta del sensor, esto debido a que la transmitancia que permite es del 0.01%, y el arreglo de fotodiodos utilizado requiere una intensidad de radiación solar mayor para poder proporcionar una respuesta.

Fuera de la atmósfera terrestre, la cantidad de radiación solar es de una magnitud promedio de 1353 W/m^2 sobre una superficie perpendicular a la propagación. Este valor es conocido como *constante solar*. Debido a la absorción y desviación de energía en la atmósfera, a nivel del mar ésta energía se reduce a 1000 W/m^2 . Los factores que influyen en esta reducción de energía son: los gases atmosféricos, el vapor de agua y el polvo, entre otros ([Ruiz 2003](#)).

Las condiciones ambientales que imperan en órbita, como son los gradientes de temperatura, así como la radiación ionizante, el alto vacío y el viento solar, son factores de gran importancia en el diseño de los sensores, y deben ser tomados en cuenta durante las pruebas de funcionamiento y la operación.

4.4. Ubicación de los sensores de Sol en el satélite.

Se ha propuesto un arreglo como el mostrado en la [figura 4.16](#). Este arreglo pretende lograr una cobertura lo más amplia posible, que será de gran importancia en las primeras horas de vida del satélite, donde es imprescindible conocer con exactitud la orientación para establecer el momento apropiado para desplegar la extensión telescópica (gravity boom), que cambiará los momentos de inercia del satélite y lo forzará a apuntar una de sus caras hacia la Tierra.

Tabla 4.3. Cobertura de los tres sensores.

Número de sensor	Inclinación
1	0 Grados
2	45 Grados
3	90 Grados

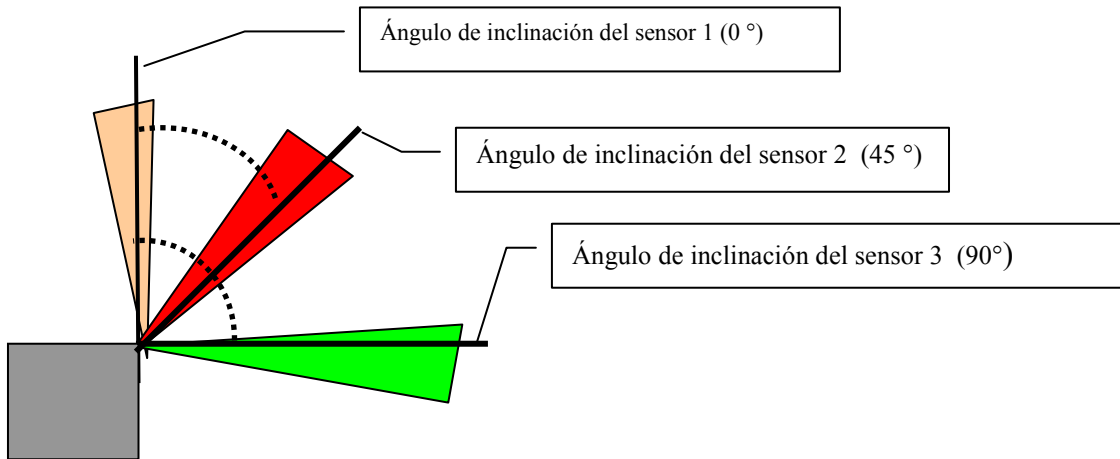


Figura 4.16. Ángulos de inclinación de los sensores de sol.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan, de manera resumida, los resultados finales de las pruebas efectuadas al sensor, así como las conclusiones de este trabajo de tesis; tomando en cuenta los datos obtenidos en todos los ensayos realizados, incluyendo por supuesto, aquellos obtenidos del sensor ya montado en su circuito impreso y en su caja.

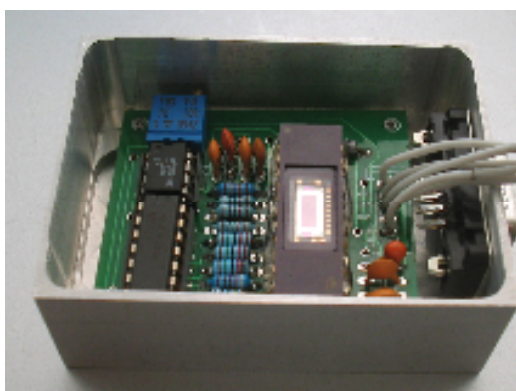


Figura 5.1. Sensor solar en un eje, basado en un arreglo lineal de fotodiodos.

5.1. Pruebas finales de funcionamiento en Tierra.

La rendija se colocó a una altura de 2.65 mm sobre la ventana de cuarzo de nuestro sensor, con esta altura se logra un campo de visión de ($\pm 22.5^\circ$), además de una respuesta aproximadamente lineal. El principal inconveniente de esto fue que ya en el diseño final, el filtro óptico de densidad neutra tuvo que ser colocado encima de la rendija.

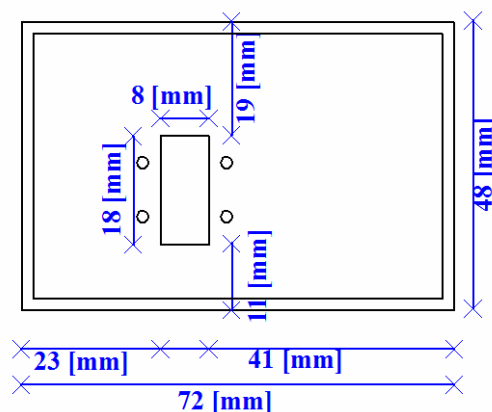


Figura 5.2. Tapa del sensor solar.

Las pruebas realizadas en Tierra fueron para asegurar que el sensor de Sol funcione de acuerdo a lo estipulado en el diseño. A grandes rasgos las pruebas efectuadas y sus resultados se enuncian a continuación:

1). A diferencia de la mayoría de los arreglos con fotodiodos que utilizan un sistema de obtención de datos en tiempo real, el detector empleado obtiene la información a través de un sistema de integración, es decir, el arreglo de fotodiodos al ser expuesto a la luz, va guardando temporalmente la información en forma de campo eléctrico en la capacitancia formada en las uniones de cada uno de los fotodiodos. Posteriormente la información es obtenida de forma secuencial con la ayuda de un conmutador direccional conectado a cada uno de los fotodiodos. Por tanto, la salida del sensor es proporcional al producto de la intensidad de luz por el tiempo de integración.

2). Para obtener la señal de salida del sensor fue necesario utilizar un rectificador de media onda, con el que se obtuvo únicamente la señal en corriente directa necesaria para hacer la conversión a grados.

3). Para que el circuito de acondicionamiento no se saturara, debido a la intensidad luminosa emitida por el Sol, fue necesario colocar un filtro de densidad neutra (OP4 ND) éste reduce la potencia original al 0.01%. Los filtros de densidad neutra bloquean el paso de la luz en el visible, es decir, atenúan toda la gama de colores sin provocar distorsiones. Para la calibración final se sometió al circuito a la intensidad aproximada de 1350 W/m^2 , que es la potencia esperada en órbita, por medio de una lámpara de halógeno de 2000W colocada a 80 cm de distancia. El ajuste definitivo, deberá hacerse en órbita.

4). Las curvas reales de intensidad se obtuvieron de las pruebas de voltaje vs. inclinación, que se realizaron con la lámpara de halógeno y la intensidad luminosa fue determinada gracias al medidor solar, que nos proporciona la intensidad directamente en W/m^2 .

5). Para poder realizar la calibración del sistema, nos apoyamos en una brújula electrónica, que nos proporcionó la inclinación real de la plataforma de pruebas, evitando problemas con el juego que existe en el acoplamiento de sus engranes. El ángulo de inclinación de la brújula fue comparado con los voltajes de salida de la etapa de acondicionamiento, y así se logró su calibración.

6). Se diseñaron y construyeron un circuito impreso y un contenedor especial para la electrónica de acondicionamiento de las señales proporcionadas por el arreglo lineal de fotodiodos.

7). Las longitudes de onda de la lámpara y del sensor no fueron exactamente iguales, por lo que esperamos que la calibración en órbita compense esta diferencia. La lámpara emite longitudes de onda de 380 a 750 nm, mientras que el sensor capta de 400 a 850 nm.

El resultado final se muestra en la siguiente figura:

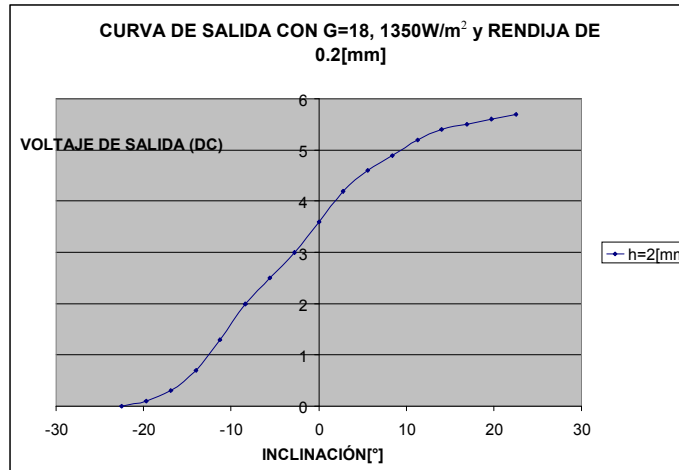


Figura 5.4. Curva final de calibración del sensor Solar.

5.2. Conclusiones.

A partir del desarrollo del presente trabajo se pueden mencionar de manera puntual las siguientes conclusiones:

- Se diseñó y manufacturó un sensor de Sol para detección de orientación, basado en el apuntamiento del vector solar con un arreglo lineal de fotodiodos de 256 elementos, el cual proporciona información con una resolución de $\pm 0.18^\circ$, con un campo de vista de $\pm 22.5^\circ$, en un solo eje de referencia del satélite.
- Se cumplió cabalmente con el objetivo planteado al inicio de este proyecto de desarrollar un sensor de Sol inmune a los cambios ambientales. El arreglo lineal de fotodiodos utilizado mantiene estables sus características de respuesta aún después de una larga exposición a la radiación solar. La ventana de cuarzo y el filtro óptico le proveen de protección contra estos efectos.
- El circuito fue calibrado utilizando una intensidad luminosa semejante a la que encontrará en órbita terrestre. Un medidor de potencia luminosa y una brújula electrónica sirvieron para validar los parámetros de calibración.

REFERENCIAS

Acondicionamiento de señales (2007). Tutorial.

<http://digital.ni.com/worldwide/latam.nsf/web/all/D864C2C25C7B5EE086256F490070432B>

Barber Rodrigo (2008)

<http://www.cienciasmisticas.com.ar/electronica/semi/tdiodos/index.php>

Carletti Eduardo (2007a) http://robots-argentina.com.ar/Sensores_CCD.htm

Carletti Eduardo (2007b) http://robots-argentina.com.ar/Sensores_fotodiodos.htm

Domínguez Sánchez J.J. (1998) "La llamada desde el espacio". Anales de mecánica y electricidad, ISSN 0003-2506, Vol. 75, Fasc. 4, pp. 32-49

http://64.233.179.104/scholar?hl=es&lr=lang_es&q=cache:2V-4gi4EUMkJ:dialnet.unirioja.es/servlet/articulo%3Fcodigo%3D2704%26orden%3D85791%26info%3Dlink+nano+satelites

Electrónica Unicrom (2008) http://www.unicrom.com/Tut_rectificador_media_onda.asp

Fotonostra (2007) <http://www.fotonostra.com/glosario/cmos.htm>

Graeme Jerald (1986) "Operational Amplifiers. Design and Applications". Mc Graw-Hill..

Humphreys T. E. (2002) "Attitude determination for small satellites with modest pointing constrains". Space Dynamics Lab. Utah State University. Monograph report.

Landis Geoffrey (2000) "Lightweight Sun-Position Sensor Developed"

<http://www.grc.nasa.gov/WWW/RT/RT2000/5000/5410wilt.html>

Layout Editor <http://www.cadsoft.de/>

Meteored (2008) <http://www.meteored.com/ram/numero23/abcoscuro.asp>

Miranda V.M (1998) "Diseño y construcción de un sistema de adquisición de datos para detección de orientación y control de estabilización de satélites". Tesis de Licenciatura. Ingeniería Electrónica. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM

Prado J (1993) "Diseño de un sistema para detección de orientación de un satélite". Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM. México.

Prado J. (2007). "Sistema de simulación para pruebas de algoritmos de orientación y control de satélites pequeños" Tesis de Doctorado. Facultad de Ingeniería, UNAM. México. pp1-171

Prado J. y Nápoles E. (2008) "Sensor de Sol Basado en Arreglos Lineales de Fotodiodos para Determinar la Orientación de un Satélite". SOMI XXIII Congreso Nacional de Instrumentación. Jalapa, Veracruz, México. Octubre 1-3. Trabajo No. JPMXXIII83. pp 1-5.

Rodríguez Luciano (2003) "El clima espacial: ¿satélites y astronautas en peligro?".
Ciencia Hoy, ISSN 1666-5171, Vol. 13, N° 74, Abril-Mayo.
http://64.233.179.104/scholar?hl=es&lr=lang_es&q=cache:KAtMTREKUO4J:solweb.oma.be/users/rodriguez/files/rodriguez03-ch.pdf+nano+satelites

Ruiz D. (2003) "Sensor de sol para detección de orientación de satélites". Tesis de Licenciatura. Ingeniería Electrónica. Facultad de Ingeniería, UNAM.

Surrey Satellite Technology LTD. (2006) "University of Surrey, Guildford, UK".
<http://www.sstl.co.uk>

Technical Information SD-26 (2006) "Characteristic and use of NMOS linear image sensors". Hamamatsu. pp 1-12

Universidad Politécnica de Valencia (2007)
http://www.upv.es/satelite/trabajos/Grupo5_b99.00/ESTABILIDAD.htm

Universidad de Sevilla (2007)
<http://www.eup.us.es/portada/depart/practdte/p6.pdf>

Wertz J.R. (1990) "Spacecraft Attitude Determination and Control". Kluwer Academic Publishers.