

18
Lej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE
ADQUISICION DE DATOS PARA DETECCION DE
ORIENTACION Y CONTROL DE ESTABILIZACION
DE SATELITE"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO Y ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

VICTOR MANUEL MIRANDA CENTENO

ASESOR: M. EN I. JORGE PRADO MOLINA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

FALLA DE ORIGEN

270043 1999



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

F. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Diseño y construcción de un sistema de adquisición de datos para detección de orientación y control de estabilización de satélite".

que presenta el pasante: Victor Manuel Miranda Centeno
con número de cuenta: 8839587-6 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 15 de junio de 1998

PRESIDENTE

Ing. Ubaldo Ramírez Urizar

VOCAL

Ing. Blanca de la Peña Valencia

SECRETARIO

M. en I. Jorge Prado Molina

PRIMER SUPLENTE

Ing. Margarita López López

SEGUNDO SUPLENTE

Ing. Juan Gonzalez Vega

Agradezco a Dios, a mis padres, a Jorge Prado Molina y a todas aquellas personas que de alguna manera sirvieron de motivación para la realización de esta tesis.

El individuo no vive sólo, puesto que uno depende del otro para construir las cosas de la vida. Es por ello que este trabajo es producto de la labor ardua de varias personas, que sin ellas no podría haberse concretado. Doy gracias pues, en el orden dado arriba, a la gente que ha estado involucrada en esta tarea concluida.

ÍNDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Detección de orientación	2
1.1.1. Requisitos de orientación para un satélite de percepción remota	4
1.1.2. Precisión de los sensores	5
1.2. Método de intersección de conos	6
1.3. Utilización de un simulador para detección de orientación	7
1.3.1. Descripción de la plataforma de simulación	8
1.3.2. Balero de aire esférico	8
1.3.3. Ubicación de los sensores de orientación en la plataforma	9
2. SENSORES DE ORIENTACIÓN	11
2.1. Diferentes tipos de sensores de orientación; de sol, de tierra, de estrellas, giróscopos, magnetómetros, etc.	11
2.2. Sensor de sol	13
2.2.1. Diferentes configuraciones de detectores de sol; analógicos, digitales, fotodiodos y celdas solares	14
2.2.2. Empleo de las celdas solares en la detección de orientación	18
2.2.3. Efecto fotoeléctrico	20
2.2.4. Características del sensor seleccionado	21
2.3. Sensor de tierra	23
2.3.1. Configuraciones principales: sensores de barrido y estáticos	24
2.3.2. Sensor de tierra experimental para prueba en el laboratorio	26
2.3.3. Sensor infrarrojo con detectores de selenuro de plomo	28
2.3.3.1. Construcción de un sensor de tierra prototipo	28
2.4. Interfaces con el microcontrolador	30
2.4.1. Circuitos de acondicionamiento de señales	30
2.4.2. Interfaz con el microcontrolador	30
3. FILTRADO DIGITAL DE SEÑALES	32
3.1. Filtrado, estimación y ajuste a una curva de segundo grado	33
3.1.1. Diseño de un filtro con ajuste a una curva de segundo grado por el método de mínimos cuadrados	34
3.2. Selección del lenguaje de programación	38
3.3. Tipo de microcontrolador y características operativas	39
3.3.1. Modo de operación del microcontrolador	39

4. RUTINA DE GRAFICACIÓN Y DESPLIEGUE	42
4.1. Necesidades de visualización	42
4.2. Diagramas de flujo de las rutinas de graficación	43
5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE DETECCIÓN DE ORIENTACIÓN	47
5.1. Pruebas de orientación en el laboratorio	47
5.1.1. Curvas de respuesta de los sensores antes y después de filtrar	48
5.2. Calibración y precisión en la detección de orientación	48
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
6.1. Conclusiones	51
6.2. Recomendaciones	52
APÉNDICE A	53
APÉNDICE B	77
APÉNDICE C	82
REFERENCIAS	83

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA DETECCIÓN DE ORIENTACIÓN DE SATÉLITES.

RESUMEN

El objetivo central de este trabajo es el diseñar, construir y probar un sistema de adquisición de datos para detección de orientación, utilizando las señales provenientes de un sensor de sol y un sensor de nadir terrestre. Ambos proporcionan dos ángulos de apuntamiento independientes, necesarios para que el sistema de detección de orientación -basado en un microcontrolador - pueda determinar la desviación de la nave con respecto a su vertical local.

Se presenta el diseño y la construcción del sensor de sol; que se compone básicamente de dos pares de celdas solares alineadas en dos ejes ortogonales, y que envía al microcontrolador una señal analógica, cuya magnitud es proporcional al ángulo de desviación. El sensor de tierra tiene cuatro sensores infra-rojos, colocados en pares y alineados en dos ejes ortogonales, y a semejanza del sensor de sol, también entrega una señal analógica proporcional al ángulo de apuntamiento, al detectar la emisión térmica del planeta.

Las señales provenientes de los sensores son conducidas al microcontrolador, pasan a través del convertidor analógico/digital y son enviadas a una rutina de filtrado o eliminación de ruido; para finalmente ser enviadas por el puerto serial asíncrono, hacia una pc donde se lleva a cabo la conversión a un ángulo de apuntamiento y se realiza el despliegue tanto numérico, como gráfico; en el monitor

Se describe el modo de operación del microcontrolador, los sensores; así como su electrónica de acondicionamiento y amplificación, el algoritmo utilizado para el filtrado digital de las señales de los sensores y la rutina de graficación y despliegue de la orientación.

Las pruebas de detección de orientación se llevaron a cabo en un simulador para detección de orientación y control de estabilización de satélites pequeños. Es una plataforma circular, de aproximadamente 76 cm. de diámetro y construida con materiales compuestos para evitar elongaciones o contracciones causadas por cambios de temperatura y está suspendida sobre un balero de aire esférico, que permite el movimiento en tres ejes de rotación con fricción casi nula.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La necesidad de crear y producir nuevos desarrollos tecnológicos en México se hace cada vez más imperiosa, ante el avance de muchos países en este campo. Sin embargo, dada la gran tendencia que tenemos para adquirir la tecnología del exterior, debemos cambiar de actitud y plantear la meta de asimilar conocimientos y aplicarlos a nuestras necesidades. El presente trabajo tiene como uno de sus objetivos principales el fomentar el desarrollo de la tecnología espacial en nuestro país, y a la vez revertir esta experiencia en aplicaciones terrestres; a través de la implementación de un sistema de detección de orientación que será utilizado para control de orientación de satélites.

Los satélites han sido en las últimas décadas una herramienta indispensable en el progreso de los pueblos. Es por ello que en México no debemos descuidar esta área. Debemos aprovecharlos además de las aplicaciones en telecomunicaciones, en otra área no menos interesante: la percepción remota; que nos permite obtener imágenes del planeta para, a través de ellas, recabar información estadística de los recursos naturales o registrar la evolución de las concentraciones urbanas en algún territorio, solo por mencionar un par de ejemplos. La meta final debe ser la de generar sistemas de información geográfica, que proporcionen bases de datos históricas y sobre todo actualizadas que permitan a los que tienen en sus manos las decisiones, poder llevar a cabo su trabajo de una manera objetiva. Los satélites de percepción remota, tienen como función primordial la de obtener imágenes de la superficie terrestre y enviarlas a una estación terrestre para su posterior interpretación. A pesar de que lo anterior puede realizarse por medio de fotografía o video con barridos desde aeronaves, tal tarea resulta laboriosa y tardada cuando se trata de realizar estudios más extensos, ya que es impráctico realizarlo con estas técnicas. Estos mismos servicios de percepción remota satelital son ofrecidos por algunos gobiernos y empresas y vendidos a quienes así lo solicitan. Sin embargo, su utilización en los países en vías de desarrollo no siempre es frecuente, debido al alto costo del servicio. Es por ello que se han enfocado esfuerzos en nuestro país para desarrollar este tipo de satélites y poder ser beneficiarios de esta tecnología, al ser poseedores directos de un sistema de percepción remota satelital.

Para cumplir con tales objetivos, es necesario ya sea adquirir un satélite manufacturado por alguien más (lo cual resulta muy caro), o bien asimilar la tecnología y desarrollar satélites en nuestro país. La segunda opción resulta más constructiva en cuanto al desarrollo tecnológico propio y la investigación se refieren. Por ello, es necesario analizar con cierto detenimiento los principales aspectos que están involucrados con el desarrollo de los principales aspectos técnicos de un satélite de percepción remota.

Existen muchos requisitos que impone la construcción de un satélite, sin afán de enumerarlos exhaustivamente, podemos mencionar que la carga útil (o sistema de adquisición de imágenes, en nuestro caso), es la parte más importante, ya que a partir de las especificaciones y restricciones que imponga este subsistema, serán diseñados y construidos todos los demás. Después de la carga útil, el siguiente subsistema en importancia (por su complejidad) es el encargado de la detección de orientación y control de estabilización. El requisito fundamental es que el satélite apunte de manera continua con una de sus caras, directamente al centro de la tierra, a lo largo de toda su trayectoria orbital. Esto se hace necesario porque tanto la cámara o sistema de adquisición de imágenes, como las antenas que transmitirán la información hacia la tierra se colocan en dicha cara de la nave. Para satisfacer estos requisitos, se dota al satélite de un sistema de control de orientación con sensores, algoritmos de control y actuadores para corregir y asegurar el apuntamiento hacia la tierra. Existen además los subsistemas: estructural, eléctrico, de comunicaciones (para telemetría y comandos) y térmico. De la parte de detección de orientación nos ocuparemos principalmente en este trabajo de tesis.

Para llevar a cabo el procedimiento de orientación, se utilizan los datos provenientes de varios tipos de sensores para conocer el apuntamiento del satélite a lo largo de su órbita. Se lleva a cabo un filtrado digital de las señales de los sensores para eliminación de ruido y se alimentan los datos a los algoritmos de control para que se lleven a cabo las maniobras de orientación adecuadas, por medio de los actuadores.

Para llevar a cabo las pruebas de detección de orientación en tierra, se utilizará una plataforma de simulación, que provee de un medio sin fricción y que servirá para probar todo el sistema de control en su conjunto.

1.1.- DETECCIÓN DE ORIENTACIÓN.

La orientación de un satélite esta dada por tres ejes de rotación denominados: rotación, guiñada y cabeceo[11]. La denominación de estos ejes son análogos a los utilizados 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. En la Figura 1.1 se muestra gráficamente su ubicación.

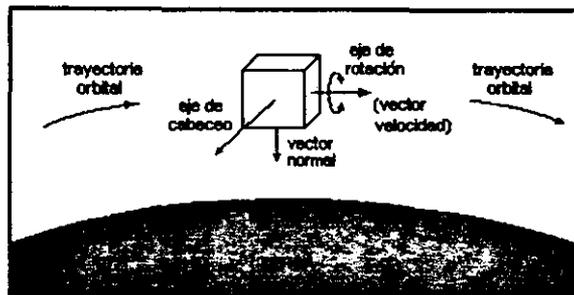


Figura 1.1

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. Este eje es perpendicular al plano del satélite que apunta hacia la tierra. Esto se ilustra en la figura 1.2

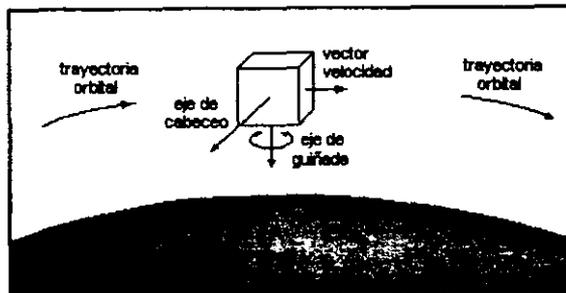


Figura 1.2

El eje de cabeceo es perpendicular a los ejes de velocidad y de guiñada, para formar un sistema de ejes ortogonales. El eje de cabeceo se muestra en la figura 1.3. De acuerdo con dichos ejes de referencia, se determina la orientación de un satélite.

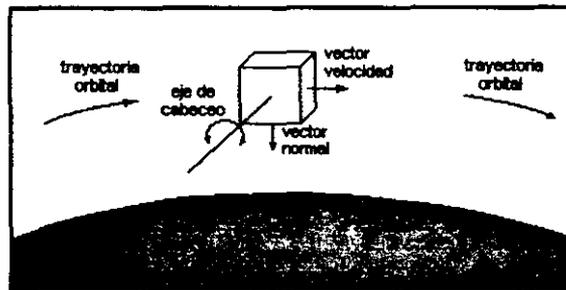


Figura 1.3

En nuestro caso consideramos al satélite como un cuerpo rígido, por lo tanto, para conocer su orientación en todo momento, utilizando las ecuaciones de Euler, es necesario conocer las variables que determinan su posición y velocidad. Dichas variables son las lecturas proporcionadas por diferentes sensores, colocados en una determinada dirección para detectar la desviación con respecto al sistema ortogonal mencionado. Los sensores de posición pueden ser: de sol, de tierra, de estrellas, magnetómetros, etc.[11]. Los sensores de velocidad son generalmente giróscopos (rate gyros), aunque es posible obtener también las velocidades a partir de la integración de señales provenientes de acelerómetros, o de la derivación de las señales de posición, así como también es posible obtener posiciones a partir de la integración de velocidades angulares, etc.^[11]. Hay que tomar en cuenta que al llevar a cabo este tipo de transformaciones, se incurre en errores tanto por los métodos numéricos utilizados en las computadoras digitales, así como el hecho de que los giróscopos presentan un fenómeno de deriva a lo largo del tiempo y sus señales deben ser recalibradas con valores absolutos cada cierto tiempo, por lo que su utilización para determinar posiciones, es limitada.

Una vez obtenida la información de los sensores para conocer la orientación del satélite, es necesario adecuar el formato de dicha señal para ser procesada digitalmente, convirtiéndola (casi en todos los casos) de una señal analógica, a una digital. De esta manera es posible llevar a cabo un filtrado para eliminación de ruido y el cálculo de la desviación. A un nivel de voltaje (o corriente convertido a nivel de voltaje) le corresponde un valor de desviación en grados. Lo anterior se explicará con más detalle más adelante, por lo pronto se muestra a continuación el diagrama de bloques del sistema de detección de orientación desarrollado en este trabajo de tesis, en una forma muy general.

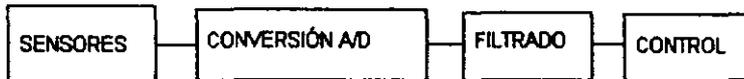


Figura 1.4. Diagrama de bloques del sistema de detección de orientación.

El proceso de filtrado es muy importante, ya que no debemos olvidar que este tipo de sistemas funciona bajo las condiciones extremas del medio ambiente orbital, donde existen gradientes de temperatura de 90 a 120 C, radiación ionizante, vacío y viento solar[12]. Además pueden existir perturbaciones internas o ruido generado por corrientes inducidas que pueden afectar las lecturas entre el valor de desviación leído y el valor real.

1.1.1 Requisitos de orientación para un satélite de percepción remota.

Si consideramos que la percepción remota exige un apuntamiento continuo y estable hacia la superficie de la tierra, para lograr la obtención de imágenes útiles, la desviación angular en cualquiera de los ejes afectaría a la imagen recogida por la cámara.

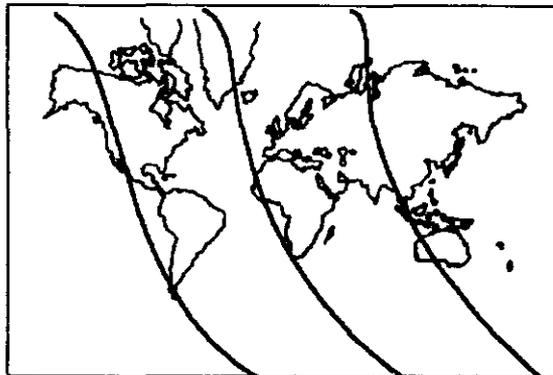


Figura 1.5 a. Barrido proyectado sobre la superficie terrestre, de un satélite con inclinación cercana a 90 grados

Hay otros factores que se tienen que considerar en un satélite de percepción remota, como el deseo de que el barrido sobre la faz de la tierra sea máximo. Por ello se exige que la forma de la órbita sea polar o cercana a ella (de 90 a 110 grados de inclinación medidos sobre el plano del ecuador), es decir, que el paso del satélite recorra órbitas casi meridionales, esto asegura el poder visitar las zonas cercanas a los casquetes polares (ver figura 1.5 a . Con la rotación de la tierra sobre su propio eje, los barridos se vuelven inclinados).

Si la órbita está alejada de los 90 grados, la cobertura sobre las regiones boreal y austral del planeta disminuye (ver figura 1.5 b). Otra característica importante de la órbita de un satélite de PR es el período de revisita, v.g. el tiempo que tarda el satélite en pasar por el mismo lugar; esto también depende de la inclinación y la altura de la órbita, y es muy importante cuando se quieren analizar procesos dinámicos. El período de revisita puede variar de 16 a 24 días aproximadamente.

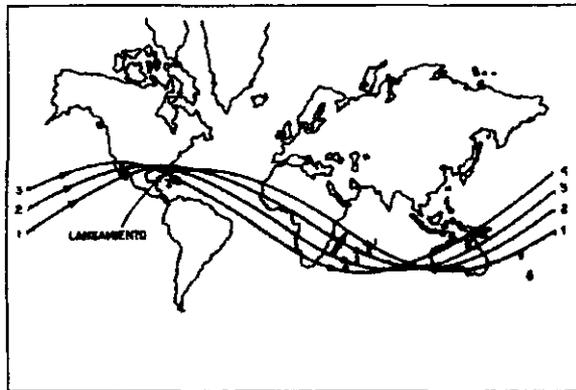


Figura 1.5 b Barrido proyectado sobre la superficie del planeta, de una nave orbitando con una inclinación de 28 grados.

Para el caso específico de un satélite de percepción remota en particular, estamos hablando de un sistema de orientación con una capacidad de apuntamiento de 0.1 grados en los tres ejes. Esta restricción ha sido determinada con base a un satélite de órbita baja, cercana a la polar, de aproximadamente 760 km de altura, con una masa de 60 Kg y con un arreglo de sensores CCD bidimensionales para adquisición de imágenes en el visible, así como algunas bandas con menor intervalo espectral (imágenes multiespectrales) con una resolución de 30 metros en el piso.

1.1.2.- Precisión de los sensores.

Para cubrir satisfactoriamente con el compromiso de obtener una precisión en el apuntamiento del satélite de un décimo de grado o seis minutos de arco, es necesario no perder de vista que los detectores, los algoritmos de orientación y los actuadores utilizados, deben mantener esta precisión en todo momento. De los detectores, en

algunos casos, es posible obtener una mayor precisión que la nominalmente determinada originalmente, con el empleo de algoritmos de filtrado y de mejoramiento de señales[9].

Ahora bien, la conversión de una señal analógica a una digital requiere de considerar la cobertura del sensor en grados, en función del número de bits manejados. Dado que las exigencias de precisión ya han sido fijadas, y tomando en cuenta una palabra de conversión de ocho bits, la cobertura en grados de los sensores (tanto el sensor de sol como el de tierra) será de $\pm 12.8^\circ$. La cobertura ideal sería de 360° , es decir, en todo el hemisferio, sin embargo lo que puede hacerse es poner varios sensores y además utilizar sensores burdos para determinar la orientación inicial y una vez terminada la primera etapa de estabilización, entonces se hace uso de los sensores finos de sol. Esto último sólo se prevé en las primeras órbitas del satélite, ya que una vez lograda la estabilización inicial, sólo en casos de maniobras o emergencia serán utilizados nuevamente los sensores burdos.

Todos los sensores y actuadores disponibles para el proyecto contarán con la suficiente precisión para cumplir con el objetivo de apuntamiento pactado. A continuación se presenta una tabla con las características más importantes de los sensores del sistema de orientación. Las características de los actuadores no se mencionan por salir del alcance de esta tesis.

TABLA 1.1 Características principales de los sensores considerados en el proyecto de un satélite de percepción remota.

Tipo de sensor	Localización	Ángulos medidos	Precisión	Observaciones
Sensor de sol	Eje de rotación	Cabeceo y guiñada	± 0.1 grados	No disponible durante eclipse
Sensor de tierra	Eje de guiñada	Rotación y cabeceo	± 0.15 grados	Disponible en toda la órbita
Magnetómetro	De preferencia alejado del cuerpo del satélite	Rotación, guiñada y cabeceo	± 1.5 grados	Disponible en toda la órbita. Poco preciso
Giróscopo	Uno en cada eje	Rotación, guiñada y cabeceo	± 0.01 grados	Disponible en toda la órbita, muy precisos. Problema de deriva

1.2.- Método de intersección de conos

Para obtener la orientación del satélite en todo momento, es necesario medir las posiciones y las velocidades de los tres ejes de rotación. Cuando alguno de los sensores de posición, específicamente el de sol, queda inhabilitado para hacer su medición (este hecho ocurre durante cada órbita), es necesario recurrir al empleo de alguna otra medición para determinar la orientación en tres ejes, mientras el satélite no salga de eclipse.

Aún cuando el satélite no se encuentre en eclipse, los ángulos de apuntamiento que proporcionan los sensores están referidos a la vertical local de la nave, y dicho eje puede estar en realidad apuntando hacia cualquier lugar de un cono con centro en el sol y radio igual al ángulo medido. Este cono alrededor del sol en un espacio inercial 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. Esto puede verse ilustrado en la figura 1.6, donde la orientación verdadera se encuentra en una de las dos intersecciones. Para seleccionar correctamente se debe tomar otra medida independiente, o hacer una estimación a partir de las mediciones anteriores.

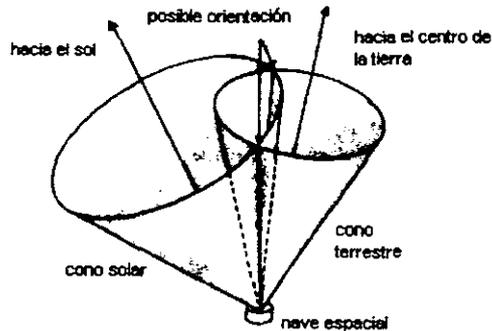


Figura 1.6 Método para determinar la orientación a partir de la intersección de los conos terrestre y solar.

Cuando el sol y la tierra se encuentran cerca o en el mismo eje, o cuando los conos se encuentran en direcciones opuestas o si están en una posición en la que no se intersectan, entonces no es posible determinar la orientación con este método. En condiciones reales de vuelo orbital, cuando no se encuentre disponible el sol, se utilizará la señal del magnetómetro o la señal integrada del o los giróscopos correspondientes para que en todo momento sea posible tener orientación en tres ejes. Este tipo de situaciones serán resueltas en etapas subsecuentes del proyecto, cuando sean programados los algoritmos de control. Por el momento, para fines de este trabajo, utilizaremos las medidas directas de los sensores de sol y tierra para determinar la orientación. En el laboratorio se simularán tanto el disco solar, como la emisión térmica del planeta y éstos estarán disponibles en todo momento, por lo que la orientación podrá ser determinada sin mayores problemas.

1.3.- Utilización de un simulador para detección de orientación.

Para poder llevar a cabo el desarrollo y las pruebas de funcionamiento de los sistemas de control de orientación de satélites, es necesario contar con un simulador que nos permita tener grandes momentos de inercia, movimiento angular en los tres ejes y un equilibrio neutral bajo cualquier ángulo de deflexión.

El diseño básico de este tipo de simuladores, consiste de una plataforma móvil donde se colocarán los componentes de los sistemas de control, suspendida sobre un soporte que permita el movimiento en los tres ejes de rotación con fricción despreciable. Esto nos lleva necesariamente a un balero de aire esférico como la única solución para soportar a la plataforma.

Los movimientos traslacionales no son esenciales para esta aplicación, sin embargo la fricción y el desbalanceo en la plataforma, con los componentes de control incluidos, deben mantenerse en un mínimo. El simulador debe ser totalmente autónomo, es decir, la energía para funcionar debe venir de él mismo, y la transmisión de información sólo es permisible a través de señales electromagnéticas, ya que el uso de cables excedería los límites de desbalanceo permitidos (5-10 gr-cm)

Este sistema permitirá simular una de las condiciones orbitales más importantes desde el punto de vista de sistemas dinámicos, la falta de fricción; además que servirá como plataforma para llevar a cabo la integración de los sensores, los actuadores, baterías, controladores y todos los aditamentos necesarios para reproducir un tensor de inercia dado.

1.3.1.- Descripción de la plataforma de simulación

Se determinó que el simulador que mejor se adapta a las necesidades de trabajo, consiste básicamente de una plataforma de forma circular con un diámetro de 76 cm, y un sistema de multiperforaciones radiales, que permite la sujección de los diferentes componentes en prácticamente cualquier posición. Se construyó de materiales compuestos para obtener una superficie con un coeficiente de expansión térmico cercano a cero, una rigidez mecánica suficientemente grande para evitar deformaciones con la máxima carga y un peso mínimo para no reducir la carga útil de simulación. El otro componente principal del simulador, lo constituye un balero de aire esférico, multiflujo, con diámetro de 10 cm., maquinado en bronce, con una capacidad de carga de 80 kg. y que genera un medio con fricción despreciable.

1.3.2.- Balero de aire esférico.



Figura 1.7 Fotografía del balero de aire esférico, con capacidad nominal de carga de 80 Kg, utilizado en la plataforma de simulación.

Los baleros de aire pueden efectivamente simular un medio ambiente sin fricción para probar instrumentos y sistemas de control de orientación de vehículos espaciales. A continuación se hace una breve descripción de los baleros esféricos multifujo, este es el tipo de balero utilizado en la plataforma de simulación diseñada y construida en este proyecto, por otros integrantes del laboratorio.

Los baleros de aire esféricos, consisten básicamente de una semiesfera; que se sujeta y sirve para sustentar a la plataforma de simulación, y una copa; que es donde se produce el colchón de aire que provee del medio sin fricción. Figuras. 1.7 y 1.8

BALERO DE AIRE ESFÉRICO.

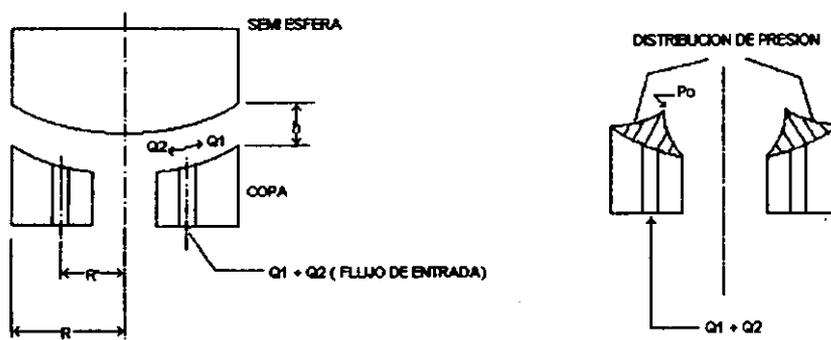


Figura 1.8 Configuración y distribución de presión en un balero de aire esférico multifujo.

1.3.3.- Ubicación de los sensores de orientación en la plataforma

Existen varios factores que hay que tomar en cuenta para seleccionar la ubicación mas adecuada para los sensores de sol y tierra en la plataforma de simulación. La orilla o borde de la mesa es la parte que proporciona el máximo campo de vista para ambos sensores. El sensor de tierra estará apuntando hacia el piso, que es donde se ubicará una placa de aluminio que simulará el disco terrestre. La posición horizontal en el sensor de sol provee el máximo campo de vista para la estimación de los ángulos de cabeceo y rotación.

La ubicación del sensor de sol en un extremo de la plataforma en lugar del centro de la misma, introducirá un problema de paralaje, debido a que existirá una variación entre la medición efectuada por el sensor y la desviación o rotación de la plataforma alrededor de su centro; este problema es debido a la cercanía de la fuente de luz. En el caso de la aplicación espacial, esto no sucederá, debido a la gran distancia que separa a las naves

espaciales y la fuente de luz (el sol). Con una adecuada calibración de la salida del sensor con relación a la misma salida pero con el sensor montado en el centro de la plataforma, se elimina este problema.

□

CAPÍTULO II

SENSORES DE ORIENTACIÓN

Los sensores, se valen de las propiedades físicas y de la naturaleza de las señales que llegan hasta ellos para proporcionarnos una medida de algún fenómeno que nos interese medir. Así, los elementos transductores que son utilizados para convertir estas señales dependen de, por ejemplo, la incidencia de la luz del sol, de la radiación infrarroja térmica de la tierra, de los vectores del campo magnético terrestre, o del efecto inercial de cuerpos giratorios, etc.

Dicha información es recibida y clasificada dada su importancia en ese momento; así, la información del sensor de sol no es importante cuando el satélite se encuentra en la etapa de eclipse, por lo tanto, se hace uso de otros recursos o métodos de sensado de la orientación. Es por ello que, aunque en muchos casos las lecturas del sensor de sol y el sensor de tierra son las más deseadas, por las razones expuestas en el capítulo anterior, no siempre se puede depender de ellos. Existe una gran variedad de sensores de orientación que le permiten al satélite conocer con cierta exactitud su orientación. En la siguiente sección se describen las diferentes formas de detección de orientación y una breve explicación de su funcionamiento.

Cabe recordar que a partir de los requisitos impuestos por la carga útil de la nave, hemos establecido el diseño de los demás subsistemas; es por esta razón que en este proyecto estamos particularmente interesados en la orientación en tres ejes. Existen otros métodos de estabilización normalmente utilizados en nuestros días, como por ejemplo aquellos estabilizados por giro, o aquellos que colocan una rueda inercial en el eje de cabeceo y bobinas magnéticas para amortiguar el movimiento disminuyendo la desviación en dicho eje, o aquellas naves que deben mantener una cara apuntando hacia la tierra no importando si ésta gira sobre el eje vertical y solamente cuidando debidamente la orientación en dos ejes, etc.

2.1.- Diferentes sensores de orientación; de sol, de tierra, de estrellas,

giróscopos, magnetómetros, etc.

Sensor de Sol

Una forma de determinar la posición de uno de los ejes de orientación de un aparato espacial es el medir el ángulo de una referencia conocida, como puede ser la posición del sol. Como se sabe en qué posición debe encontrarse en todo momento dicho eje, esto posibilita que un programa de control envíe una señal a los actuadores, de tal duración que permita la aplicación de la magnitud y sentido de las fuerzas necesarias para la corrección del apuntamiento de la nave. Por tanto, si se quiere contar con el sol como referencia de

orientación se requiere un dispositivo capaz de indicar la dirección en la que éste se encuentra.

El sensor solar puede tener distintas configuraciones[10]. En todas sus formas se detecta la desviación, en grados. Algunos son de tipo analógico y otros de tipo digital. El intervalo de operación está definido por el campo de visión y normalmente se ubica en los ejes de cabeceo y guiñada. Se entiende por campo de visión a la porción visible detectable por el sensor, medible en grados. En la sección 2.4.1. se proporciona información más detallada de los tipos de sensores solares. Existen varios de ellos, que proporcionan la suficiente información para indicar la posición correcta en dos ejes independientes. La selección de éste dispositivo debe basarse en el análisis de sus características, ventajas y desventajas.

Sensor de Tierra

El principio de funcionamiento del sensor de tierra es similar al sensor de sol. Se detectan dos ángulos en los ejes de cabeceo y rotación. En este tipo de sensor se aprovecha la emisión térmica de la tierra, o mejor aún, se hace uso de la capa de CO₂ de la atmósfera ($\lambda=14-16 \mu\text{m}$)[11], lo que permite tener una mejor resolución al medir en una zona más pequeña. Dada la cercanía de la tierra, se obtiene una gran amplitud de campo de visión al rastrear los horizontes a 120° aproximadamente (dependiendo la altura de la órbita). Se necesitan detectar los horizontes sobre los ejes del satélite para conocer la desviación, es por ello que se requiere una visión gran angular. Existe la modalidad de colocar dos sensores giratorios o rotativos montados sobre el eje de cabeceo de la nave, cada uno de ellos proporcionará un pulso al venir barriendo el espacio frío y encontrarse con la emisión infrarroja de la tierra (ver figura 2.13). Al analizar la ocurrencia de los pulsos y compararlos con la base tiempo del satélite, es posible determinar la desviación. Estos sensores presentan la desventaja de contar con partes mecánicas móviles, por otra parte, es posible utilizar un arreglo de sensores estáticos que tenga la suficiente cobertura del planeta, aunque en este caso el número de componentes se incrementa y es necesario construir la óptica adecuada para la proyección de la radiación infrarroja sobre los sensores.

Sensor de estrellas

El sensor de estrellas es un caso especial de sensores de orientación. Se trata de un dispositivo con un reducido campo de vista, una óptica compleja que es capaz de detectar pequeños cuerpos luminosos en el espacio. Para determinar un punto de referencia preciso, es necesario identificar una estrella en particular a partir de patrones o catálogos de estrellas. Es necesario llevar a cabo un cuantioso proceso de correlación para determinar la orientación. Es el sistema de detección de orientación más preciso pero es muy caro y muchas veces es necesario hacer uso de estaciones de cómputo en tierra y enviar los resultados a la nave[11].

Giróscopos

El movimiento angular de una masa permite tener una referencia inercial ante un cambio de la posición. Puesto que el cuerpo giratorio tiende a conservar su inclinación por

inercia, un sistema con un soporte articulado sobre un balancín, es empleado para medir las variaciones de inclinación del satélite con respecto a las del cuerpo giratorio.

La precisión del giróscopo es sensiblemente mayor y es por ello muy recomendable su utilización, pero existe el problema denominado de "deriva" que es el efecto de desviación de su inclinación normal a medida que transcurre el tiempo. Dependiendo de la calidad del sensor puede necesitar recalibrarse desde unas decenas de minutos, hasta en varias horas .

Lo más deseable es colocar un giróscopo en cada eje de giro del satélite. La adquisición de tales dispositivos resulta ser muy costosa se requieren permisos especiales para su compra, por lo que sería muy interesante llevar a cabo su desarrollo con tecnología propia.

Magnetómetros

Dado que en la tierra se genera un campo magnético y que ha sido posible determinar sus valores de intensidad y de dirección, tanto en su superficie como a diferentes alturas, a través de mediciones directas y también se han desarrollado algunos modelos matemáticos; es posible detectar en forma burda, la orientación los tres ejes ortogonales de referencia del satélite. La medición del campo magnético llevada a cabo por el magnetómetro en una órbita dada, se compara con el modelo geomagnético y se determina de esta manera la desviación. Puesto que la variación en forma e intensidad del campo magnético de la tierra se presenta por diversas causas; la principal es el viento solar, sólo se puede hacer una estimación aproximada de la orientación del satélite, esto significa que la precisión del dispositivo no es muy buena aproximadamente ± 2.3 grados.

Para el uso del magnetómetro es necesario conocer un modelo del campo magnético, para así poder dar una interpretación a sus lecturas. Los parámetros a considerar para tal labor es la trayectoria de la órbita, horario de la lectura y modelo estimado del campo magnético terrestre para tal punto. Aunque hay muchas posibilidades de encontrar lecturas del campo magnético similares en tres ejes en algunos otros puntos de la trayectoria orbital, estos se descartan por las efemérides del satélite, y de esta manera la orientación es determinada sin mayores dificultades.

Éstos son los sensores más utilizados para la detección de orientación de satélites con respecto a un sistema inercial de referencia montado en el cuerpo de la nave. Para los fines y el alcance de este trabajo de tesis, solamente se desarrollaron los sensores de sol y de tierra.

2.2.- Sensor de sol

Es uno de los tipos de sensores más utilizados debido a la precisión y utilidad de sus lecturas en la detección de orientación del satélite. Dado que existen en el mercado muchos tipos de sensores de sol, se debe elegir el método más conveniente para su empleo en el proyecto. Para este trabajo se llevó a cabo una búsqueda en la literatura sobre los

diferentes tipos de sensores[10,11] solares y se seleccionó un diseño que cumple con las características de precisión. Se llevaron a cabo algunas modificaciones, la principal fué el permitir variar el ángulo de cobertura o campo de vista, para obtener una mayor flexibilidad operativa durante el desarrollo de las diferentes opciones o esquemas de orientación que pretenden cubrirse en el proyecto. Se desarrolló un prototipo, del que se describen sus principales características, tanto de diseño como de funcionamiento. En las siguientes secciones se explican aquellos parámetros que deben considerarse para elegir un dispositivo de detección de orientación solar.

2.2.1.- Diferentes configuraciones de detectores de sol; analógicos, digitales, fotodiodos y celdas solares

Existen varias formas de detección de la desviación con respecto al vector solar. Nos encontramos con sensores de sol analógicos y digitales en forma general. El modo de funcionamiento de los primeros se analiza de forma diferente que los digitales. A continuación se explica las consideraciones básicas para tratar con sensores analógicos.

sensores analógicos

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. Lo anterior se ilustra en la figura 2.1

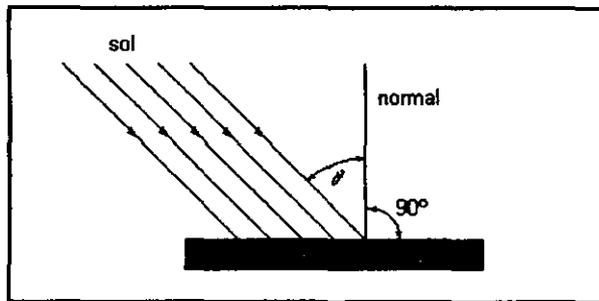


Figura 2.1. Ángulo de incidencia de rayos solares en una celda fotovoltaica.

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[2], esto es:

$$I_s = I_{máx} \cos \theta$$

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 por razón de que los elementos detectores se encuentran protegidos contra la radiación directa.

Para dar una idea del de funcionamiento de los sensores de sol externos, analicemos la figura 2.2.

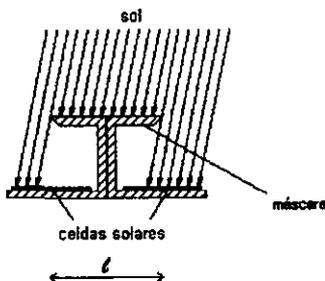


Figura 2.2. Esquema de un sensor de sol con los detectores externos.

En ella 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 la celdas solares. Ésto es válido para un eje pero es posible ampliarlo para dos si se colocan las celdas solares en forma cruzada como se muestra en la figura 2.3.

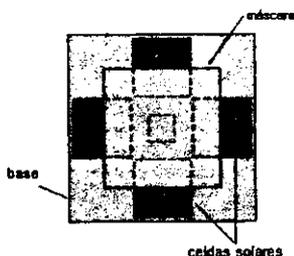


Figura 2.3. Vista superior de un sensor de sol externo con detección en dos ejes.

También existen diferentes formas de arreglar los sensores en forma interna. Se pueden colocar las celdas solares en forma cruzada o en arreglo cuadrado, en las figuras 2.4 y 2.5 se muestran estos tipos de arreglos.

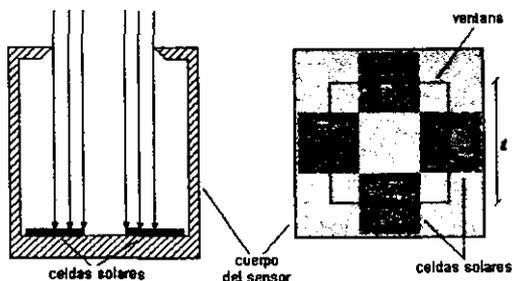


Figura 2.4. Esquema de un sensor de sol de tipo interno en arreglo cruzado.

En ellos 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 celdas. La electrónica utilizada, está calibrada para que en esta condición la salida de voltaje sea cero, a medida que el ángulo se incrementa el voltaje varía de manera proporcional al ángulo de desviación de manera lineal. Este diseño es similar al mostrado en la sección 2.º.1.

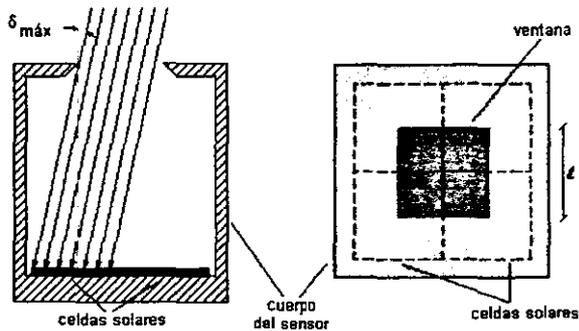


Figura 2.5. Esquema de un sensor de sol de tipo interno en arreglo cuadrado.

Para utilizar una detección fina, la configuración más adecuada es la que se logra al proyectar, por métodos ópticos, un pequeño disco solar sobre una superficie prismática como se muestra en la figura 2.6.

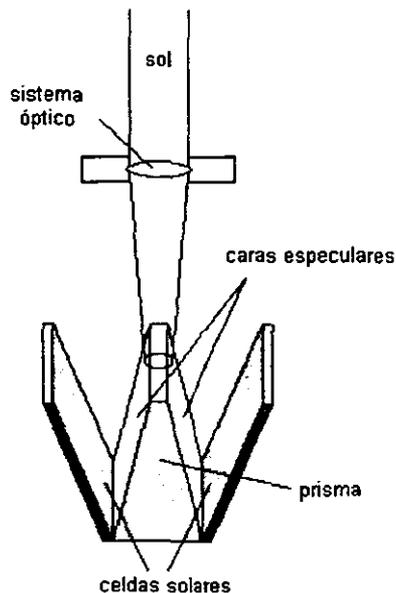


Figura 2.6. Esquema de un sensor fino de sol de campo visual reducido.

Una pequeña desviación en el apuntamiento al sol provoca que el pequeño disco proyectado tienda a iluminar uno de los dos espejos del prisma, con lo que la señal en la celda solar correspondiente al espejo es incrementada con relación a la otra. Estando el disco centrado en el vértice de los espejos, sólo una pequeña porción del disco 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.

Es posible detectar la desviación con respecto al vector solar utilizando un arreglo similar al utilizado con celdas solares en forma cuadrada, pero reemplazándolas por arreglos 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. Un sistema similar en la electrónica es utilizado para proporcionar dos señales de voltaje proporcionales a los ángulos de desviación en el eje de guiñada y cabeceo. El arreglo de los fotodiodos y la óptica se muestran en la figura 2.7.

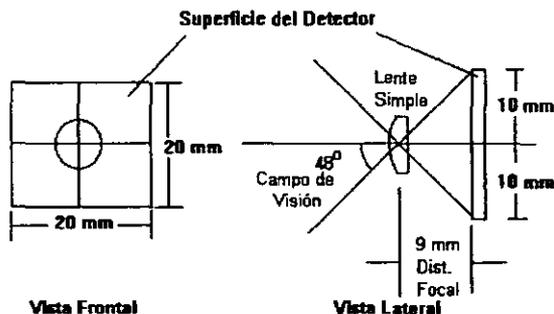


Figura 2.7. Esquema de un sensor de sol de tipo interno con fotodiodos en arreglo cuadrado y sistema óptico de enfoque.

En los sensores digitales se obtiene directamente una lectura en formato de binario, esto es, la desviación del vector solar en un eje es detectada por varios sensores dispuestos en forma tal que nos proporcionan directamente desde el bit más significativo, hasta los menos significativos; o sea, 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 2.8.

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. 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, el bit menos significativo requerirá mayor número de máscaras (tantas como diferentes combinaciones requiera la lectura). Ésto es obviamente una desventaja desde el punto de vista de manufactura para resoluciones altas.

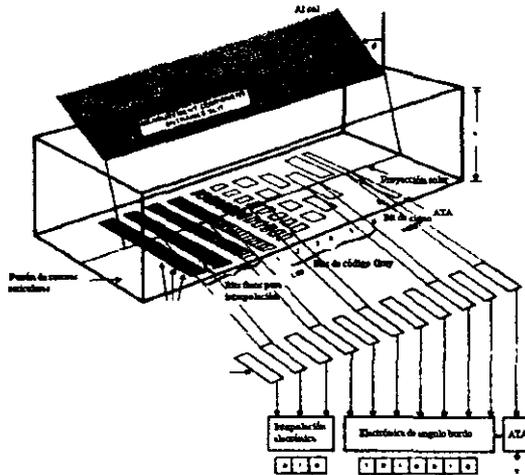


Figura 2.8. Sensor de sol de tipo digital.

2.2.2.- Empleo de las celdas solares en la detección de la orientación

Fuera de la atmósfera terrestre, la radiación solar muestra una magnitud promedio de 1353 W/m^2 en 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 variación son los gases atmosféricos, el vapor de agua y el polvo entre otros.

Las condiciones ambientales que imperan en órbita, como son los gradientes de temperatura, así como la radiación que incide en las celdas solares, son factores que conviene analizar, y que deben ser considerados en las pruebas de funcionamiento y durante la operación en los sensores que hacen uso de ellas. Esto nos lleva a efectuar una re-calibración cada cierto tiempo, ya que tanto la temperatura, como la degradación causada por la radiación, provocan que su respuesta varíe con el tiempo:

Protección contra la radiación debido al ambiente orbital

La radiación ionizante en el ambiente espacial cerca de la tierra es generalmente mas densa que en el espacio interplanetario[2]. Existe gran riesgo para los semiconductores, ya que éstos son afectados y pueden ser dañados por tormentas solares; debido a que el viento solar distorsiona el campo magnético, produce carga estática en las naves e inclusive interrumpe las comunicaciones. Los rayos cósmicos causan problemas en los microprocesadores y otros circuitos integrados, causan cambios en los estados lógicos de manera temporal o permanente, o pueden provocar daño total en el funcionamiento. 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.

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 y también pre-irradiando las celdas solares.

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.

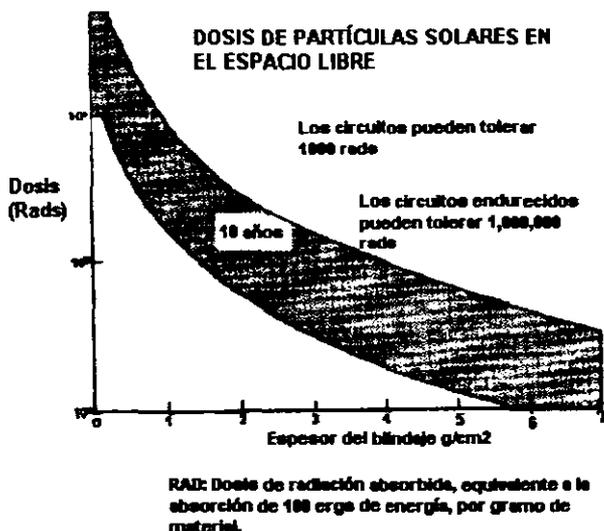


FIGURA 2.9 Protección metálica contra la radiación ionizante.

Funcionamiento de las celdas solares fotovoltaicas

Las celdas solares generan una corriente proporcional al flujo luminoso que reciben. A diferencia de otros dispositivos, éstas no requieren de una polarización externa de voltaje para generar un campo eléctrico, puesto que éste ya existe y se presenta con el dopado de un material semiconductor (silicio) formando una región N y otra región P.

El semiconductor es formado en una red cristalina, es decir, forma un arreglo de constitución cíclica y ordenada en sus átomos, siendo estable eléctricamente puesto que los electrones son compartidos entre los átomos para completar sus órbitas.

Al presentarse la radiación lumínica en la red cristalina del semiconductor, se provoca el desprendimiento de electrones dejando libre el lugar que ocupaban (huecos), y al mismo tiempo se produce un desequilibrio eléctrico que provoca un flujo de electrones y huecos. Para asegurar

que los electrones libres fluyan a través del semiconductor, se requiere que exista un campo eléctrico dentro del mismo material. Es por ello que se añaden impurezas que provocan en el silicio una tendencia mayoritaria de huecos agregando boro (material P) o de mayoría de electrones agregando fósforo (material N).

2.2.3.- Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico se puede definir como el fenómeno que presenta un material (metal) de perder electrones en condiciones especiales, al ser expuesto a una luz monocromática, es decir, de una frecuencia específica. Si iluminamos dos placas metálicas en el interior de una bombilla de cristal de cuarzo al vacío, y éstas a su vez tienen una diferencia de potencial, el efecto fotoeléctrico se manifiesta como una corriente eléctrica. La luz es energía y ésta al incidir en una de las placas metálicas del dispositivo, comunica a los electrones del metal la energía suficiente para romper su ligadura con el núcleo y viajar libres en el vacío, hasta llegar a la otra placa de potencial positivo. La suma de todos estos fenómenos individuales (electrones desprendidos) se manifiesta como corriente eléctrica, fácilmente medible[3].

Las características más importantes del efecto fotoeléctrico se describen a continuación:

- 1.- El efecto se produce siempre que exista alguna cantidad de luz, no importa que tan pequeña sea, pero no así para cualquier frecuencia. Para una frecuencia diferente de la indicada se interrumpe el efecto fotoeléctrico.
- 2.- La corriente eléctrica que se presenta es función de la diferencia de potencial en las placas y la cantidad de luz que incide en el cátodo.

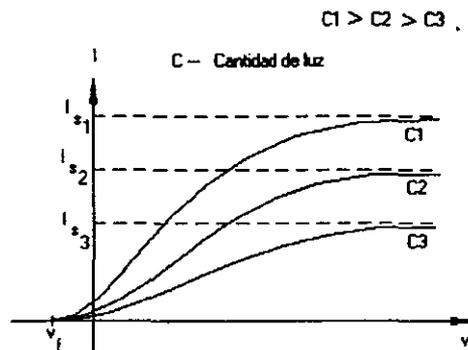


Figura 2.10. Variación de la corriente de saturación de acuerdo a la cantidad de luz incidente.

Podemos notar que aún para tensiones negativas existe un flujo de electrones, al aumentar el voltaje de manera positiva entre las placas aumenta también el flujo de electrones;

esta corriente tiene un valor límite de saturación (corriente de saturación I_{sat}). El nivel de ésta, depende de la cantidad de luz incidente en el cátodo para una frecuencia constante, por lo tanto, la corriente de saturación es función directa de la cantidad de luz, esto se ilustra en la figura 2.10.

3.- La energía cinética con la que es liberado el electrón es función de la frecuencia, pero no de la cantidad de luz incidente. Esta energía aumenta en función directa con la frecuencia a partir de un nivel denominado frecuencia de umbral y a partir de ésta se produce el efecto fotoeléctrico.

4.- El efecto fotoeléctrico se presenta de manera instantánea siempre que existan las condiciones para producirlo.

2.2.4.- Características del sensor de sol seleccionado

Nuestras necesidades para la orientación son determinantes para elegir un sensor de sol que mejor se adapte a las condiciones de operación. Se requiere una cobertura máxima en el campo de visión y una resolución en la lectura de $\pm 0.1^\circ$. El tipo de sensor que nos proporciona esta resolución sin grandes problemas y la cobertura en un campo de visión amplio, es aquel que cuenta con un arreglo de celdas solares en forma cruzada. Además de permitirnos variar el campo de vista, nos proporciona el ángulo de apuntamiento en dos ejes independientes, lo que facilita la determinación de la orientación. El desarrollo del sensor solar se guió por estas características.

La forma del sensor de sol se muestra en la figura 2.11. El análisis geométrico es mostrado a continuación.

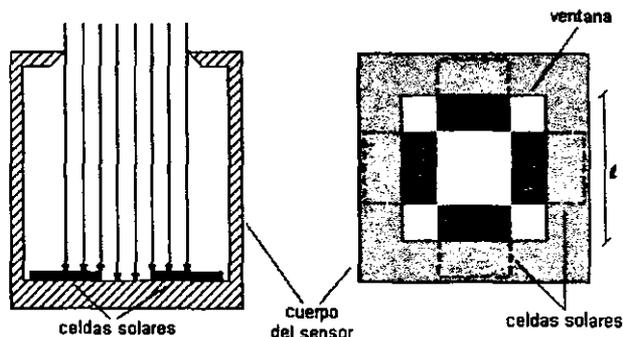


Figura 2.11. Esquema del sensor solar seleccionado (de tipo interno con arreglo cruzado).

La ventana superior es utilizada como máscara que proyecta los rayos solares al arreglo de fotoceldas. Con un apuntamiento centrado hacia el sol, la luz incidente al sensor es repartida de igual forma en cada una de las celdas. Una desviación en el apuntamiento en cualquiera de los ejes provoca una iluminación desbalanceada en las parejas de detectores, cuantificable por comparación electrónica.

La cobertura o campo de vista, está limitada por un ángulo máximo $\pm\delta_{\max}$, que está en función de la altura del sensor y de las dimensiones de las celdas y determina la máxima y mínima iluminación de una pareja de detectores. Las dimensiones de la celda solar l normalmente son determinadas por el fabricante. Podemos tomar el campo de visión $\pm\delta_{\max}$, como punto de partida para determinar la altura L , con la fórmula siguiente:

$$\delta_{\max} = \pm \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{l/2}{L} \right]$$

La lectura de salida del sensor de sol está en función de sus parámetros físicos y las ganancias en los amplificadores y comparadores de señal. Si consideramos que el ángulo de desviación, con respecto al sensor solar, es proporcional a la diferencia en las señales de salida de cada pareja de detectores, podemos concebir la ecuación para determinar la señal de error de salida como

$$e = (2KJ_L lLA)\delta$$

donde $KJ_L = K_1J_{L1} = K_2J_{L2}$, siendo K la constante de amplificación y J_L la densidad de corriente de cortocircuito de las celdas solares.

Las principales ventajas por las que fué seleccionado este tipo de sensor solar son: su sencillez de diseño y su linealidad en la respuesta. Una disminución en la sensibilidad igual en los elementos sensores del mismo eje, no altera la capacidad del sensor de indicar el error de apuntamiento. Una reducción en la sensibilidad más marcada en una de las celdas solares pares, hace que se reduzca la precisión de las mediciones del ángulo. Las variaciones de temperatura, como la degradación en las celdas solares es francamente indeseable, puesto que afectan la respuesta en la precisión de la lectura. Es por ello que la utilización de las celdas solares debe estar sujeta a métodos de compensación de ambos efectos, así como de tratamientos contra radiación como los descritos en la sección 2.2.2.

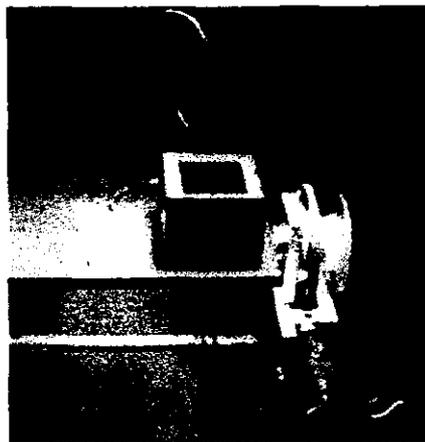


Figura 2.12. a Fotografía del sensor de sol en un banco de pruebas.

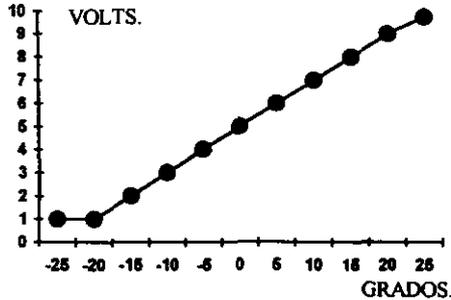


Figura 2.12 b . Curva de respuesta del sensor de sol.

Además del sensor fino de sol, es necesario 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 cae dentro del campo de visión del sensor solar fino. Puesto que no es necesario contar con una lectura precisa del apuntamiento para conducir al satélite al campo de visión del sensor solar fino, es suficiente colocar una celda solar en cada una de sus caras. Ésto 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 el 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 de sol fino.

Los detectores en las caras del satélite están 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.

2.3.- Sensor de tierra

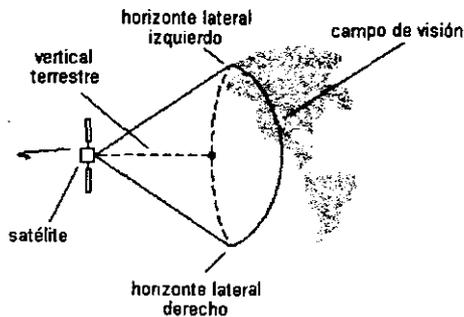


Figura 2.13. Técnica de detección del horizonte para determinar la vertical local terrestre.

Otra referencia importante para determinar la orientación de un satélite es la posición en la que éste "ve" a la tierra. Para un satélite de órbita baja; y particularmente de percepción remota, esta opción es muy importante puesto que la cámara y las antenas montadas en él, deben tener un apuntamiento continuo hacia la superficie de la tierra.

La técnica de medición de la desviación en el apuntamiento a la tierra es medida a partir de la localización de los límites en el horizonte terrestre. Al ser identificados, el apuntamiento con respecto a la normal es obtenido, como el punto medio entre los horizontes (figura 2.13). Al llevar a cabo este procedimiento se determina la desviación en un eje, usualmente el eje de rotación. Es posible también detectar un eje adicional (cabeceo) si se consideran los horizontes frontal y posterior con referencia al satélite.

De acuerdo a lo anterior, es posible contar con redundancia en la detección del eje de cabeceo por la acción del sensor de sol y del sensor de tierra combinados.

2.3.1.- Configuraciones principales: sensores de barrido y estáticos

Las distintas configuraciones de los sensores de tierra están dadas por dos categorías principales, los sensores de barrido y los estáticos[11]. Los primeros utilizan un sistema dinámico de detección del horizonte terrestre. Cuentan con un sistema de rotación

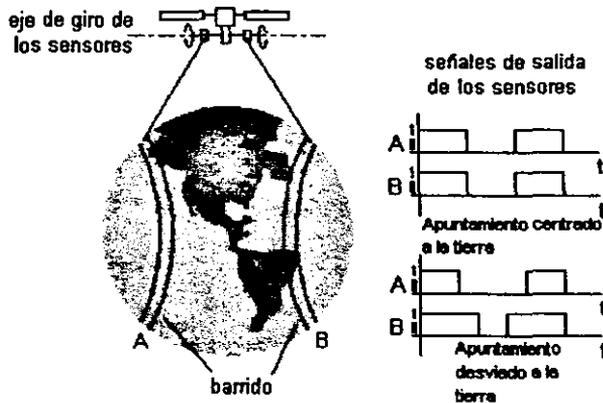


Figura 2.14. Barrido de dos sensores de tierra rotatorios

sobre un eje, que cuenta con sensores montados sobre dos ruedas en los extremos. Teniendo perfectamente alineados los sensores, la detección de los límites de la tierra es determinada mediante pulsos eléctricos definidos como alto o bajo según la detección o no detección de la tierra. La figura 2.14 muestra el funcionamiento de tal sensor de barrido.

La desviación en el eje de rotación del satélite provoca una variación en el ancho de pulso en las señales de los detectores. Ésto se debe a que el apuntamiento se desplaza hacia el horizonte en uno de los detectores, provocando una disminución de la porción vista

del disco terrestre (y en el ancho del pulso), mientras que en el otro detector la tendencia es desplazarse hacia el centro de la tierra, aumentando la porción vista del disco terrestre y con ella el ancho del pulso correspondiente. Cuando ambos pulsos se mantienen con el mismo ancho, la situación más deseable, se asegura un ángulo de desvío nulo con respecto al eje medido.

Una desventaja sería de los sensores de tierra de barrido es la tendencia a presentar fallas en el sistema mecánico, lo cual reduce su confiabilidad para misiones prolongadas. Además, proporciona torques que pueden significar transitorios no deseables para el sistema de control de orientación y estabilización del satélite.

La tendencia de los últimos años ha sido la implementación de sensores de tierra estáticos, que son más confiables y duraderos. Al no tener partes mecánicas, no es necesaria la lubricación de partes, ni piezas de peso considerable, ni transitorios por torques no deseados. Su funcionamiento se rige por la proyección del disco terrestre sobre los detectores por medio de un sistema óptico de enfoque. La electrónica complementaria al sensor es de naturaleza simple y sus señales de salida son fácilmente transferibles a un sistema digital de medición. Por todas estas razones, es que se ha decidido llevar a cabo el diseño y la construcción de un prototipo de sensor de tierra estático con capacidad de determinación de la orientación en dos ejes.

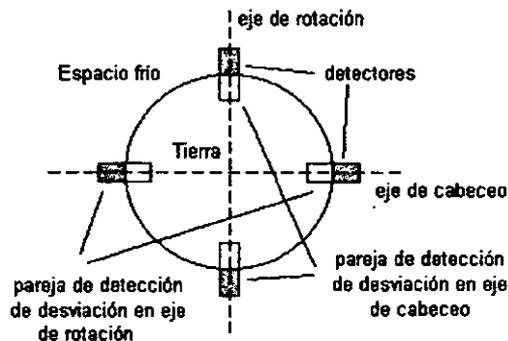


Figura 2.15 . Detección de orientación en dos ejes, con un sensor de limbo terrestre.

La óptica utilizada en un sistema de detección de limbo terrestre (sensor de tierra) consta básicamente de un ventana de filtrado óptico de 14 a 16 μm de longitud de onda, lo cual coincide con el intervalo infrarrojo térmico de la capa de CO_2 de la atmósfera de la tierra[10]. Cuenta con varios detectores y uno o varios lentes que determinan la proyección de la radiación incidente sobre los detectores. La determinación del apuntamiento se realiza con detectores colocados sobre ejes perpendiculares independientes, que reciben una proyección de la tierra sobre su superficie y entregan una salida proporcional a la porción

"iluminada" del disco terrestre. La señal obtenida es analizada por los algoritmos de control para decidir la acción a tomar con los actuadores de orientación del satélite.

2.3.2.- Sensor de tierra experimental para prueba en laboratorio

Con el objeto de probar un sistema práctico en el laboratorio y experimentar con el concepto de detección de limbo terrestre, se construyó un prototipo de sensor de tierra. Con condiciones controladas de luz es fácil trabajar con estos elementos. Debido a la forma circular de la tierra, es posible colocar los sensores y cubrirlos con una máscara, como se mostró en la figura anterior. Se construyó un dispositivo para iluminar los sensores con una fuente de luz regulada, una máscara circular que simula la proyección del disco terrestre y un cono de cartón negro, que evita los reflejos del exterior. Un arreglo de cuatro detectores ubicados en la periferia de la proyección circular son capaces de medir dos ejes de desviación, formando una pareja por eje. La respuesta en ambos detectores es comparada por la electrónica y acondicionada para producir una respuesta proporcional al valor en grados de la desviación del sensor. En éste punto, una salida de voltaje puede ser convertida a un formato digital para ser enviada hacia el sistema de adquisición de datos. Antes de experimentar con los detectores térmicos, se probó con sensores de bajo costo y de fácil adquisición. Se utilizaron fotoresistencias como detectores, con máscaras de formas distintas (figura 2.16). La respuesta del funcionamiento de las fotoresistencias fué registrado en tablas para su posterior graficación, se encontró un problema de no linealidad en la respuesta. La incidencia de luz en un incremento de unidades de área se tomaba en una función cuadrática. Para la disminución de éste problema se construyeron máscaras individuales en forma de triángulo invertido, con el objeto de reducir la no linealidad. Con esto se logró que para una intensidad de luz homogénea en el sensor, la variación de área iluminada sobre la máscara se vea incrementada en forma de una función de segundo grado que compensa en algo la respuesta del sensor.



Figura 2.16 Fotorresistencias con diferentes máscaras para reducir la no linealidad en su respuesta.

Por otra parte, la separación entre la máscara y los detectores, así como las dimensiones de éstos últimos, determinan el ángulo máximo de desviación del sensor, la cobertura o campo de visión es fácilmente determinada por métodos geométricos (figura 2.17). Se consideró que la fuente de luz es puntual y que la incidencia de los rayos al sensor es de forma paralela. El ángulo máximo de cobertura está dado por la tangente del ángulo de desviación.

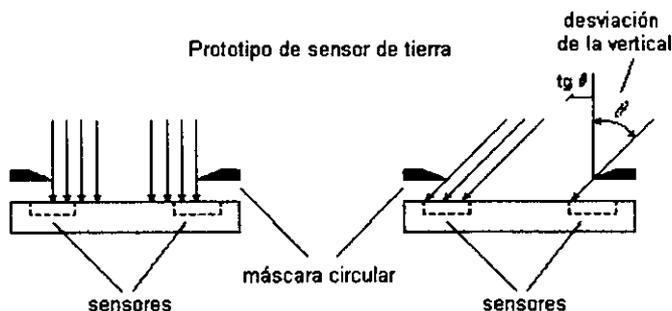


Figura 2.17. Geometría de sensor de tierra.

Para la calibración del sensor fue necesario ajustar la ganancia y el desajuste de corriente directa (offset), mediante amplificadores operacionales. Con las mismas condiciones de iluminación, se igualaron las señales de salida. Con iluminación máxima e iluminación mínima se determinan los límites de la señal en un intervalo de voltaje.

Para este tipo de pruebas es necesario bloquear en su mayoría el albedo provocado por las superficies luminosas cercanas al banco de pruebas. La toma de las lecturas se llevaron a cabo con una iluminación constante, esto permitió que las mismas lecturas fueran fácilmente reproducidas en distintas ocasiones. La experiencia adquirida permitió que se confiara plenamente en el sistema y avanzar con más conocimientos hacia un sistema de detección de limbo terrestre con sensores infrarrojos. Pese a la no linealidad de la respuesta de las fotorresistencias, fue posible asignar valores de desviación en grados de acuerdo a una tabla de valores. Los sensores infrarrojos presentan mejor linealidad, por lo que el manejo de la señal de salida no presenta mayores problemas.

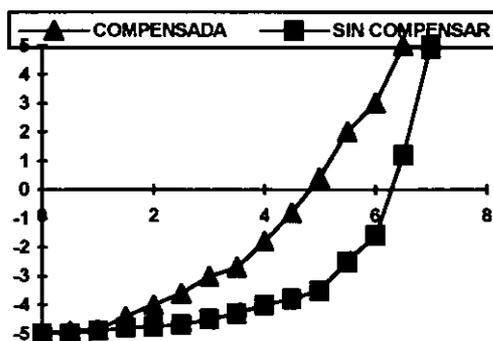


Figura 2.18. Curvas de respuesta de las fotorresistencias sin máscara y con máscara, donde es posible observar el mejoramiento de la respuesta.

2.3.3 Sensor infrarrojo con detectores de selenuro de plomo.

Utilizaremos 4 unidades ópticas independientes cada una montada sobre una base que apuntará directamente al limbo terrestre. Dos son colocadas en el eje de cabeceo y dos en el de rotación.

Cada unidad óptica tiene un lente ($\phi=2.54$ cm), que concentra la radiación IR en el punto focal (F). Un detector sensible al infrarrojo fué colocado a dicha distancia F (6 cm), éste proporcionará un voltaje de salida proporcional al ángulo de desviación. Cuando el satélite no presente desviación alguna, todos los detectores registraran valores de voltaje iguales, en caso contrario, los voltajes de cada unidad variarán y dichos datos serán digitalizados y transportados a la computadora de la nave donde se compararán con la base de datos almacenada en memoria. Dicha base de datos contendrá la información de todas las posibilidades existentes de valores para las unidades ópticas. Para cada combinación de valores habrá un equivalente a los ángulos de desviación sobre los ejes de cabeceo y rotación.

2.3.3.1.- Construcción de un sensor de tierra prototipo.

El primer prototipo fue realizado con detectores de Selenuro de Plomo -(Optoelectronics, Inc. modelo OTC-11-5), que aunque su respuesta espectral es de 1 a $4\mu\text{m}$, lejos de las 14-16 μm de la capa de CO_2 , nos sirvió para probar el concepto de medición de desviación de orientación, en el laboratorio, con sensores infrarrojos. Estos detectores al ser polarizados, funcionan como un resistor variable. La radiación infrarroja induce cambios en la conductividad con lo que se varía la corriente que pasa a través del detector. Para efectos de construcción del prototipo se utilizó un tubo metálico para contener el lente y el detector, la electrónica de acondicionamiento y la etapa de filtrado tanto analógico como digital, se encuentran fuera del sensor.

2.3.3.2. Pruebas de funcionamiento.

Cada detector es alimentado con 50 volts a través de una resistencia de 1Mohm para disminuir la corriente. El detector cuenta con un enfriador, para reducir el ruido de fondo de esta clase de sensores. Se hicieron las primeras pruebas iluminando al detector con una lámpara incandescente, conectada a una fuente regulada para evitar variaciones de intensidad, y se utilizó un soporte giratorio para simular la inclinación. Se observó que el voltaje oscilaba alrededor de los 45 volts dependiendo de la cantidad de luz IR. Para tener una señal más pequeña se hizo un divisor de voltaje, de este obtuvimos un voltaje (V_a) oscilando alrededor de los 4 volts. Se conectó la señal a un seguidor, a un amplificador de diferencias para quitarle una corriente de directa de 4 volts y así procesar únicamente la variación de voltaje del detector, y finalmente se envió a un inversor.

La señal de salida (V_b), registrada en el osciloscopio, estaba muy ruidosa. Para subsanar este hecho, se diseñó un filtro paso bajas de configuración Sallen & Key, con frecuencia de corte a 5Hz. Para lograr una mejor filtración del ruido, se colocaron dos filtros en cascada. Posteriormente la señal se envió a un microcontrolador donde se lleva a cabo la conversión A/D y un ajuste de segundo orden por mínimos cuadrados. Posteriormente se llevará a cabo la transformación a hexadecimal del valor de desviación en grados.

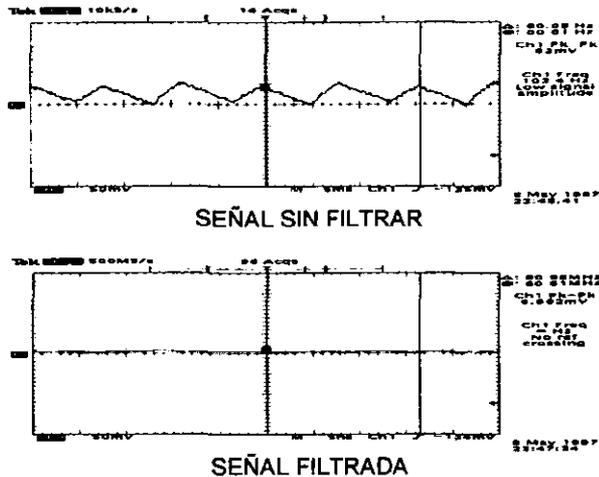


Figura 2.19. Eliminación de ruido de las señales con filtros de Salen and Key en cascada.

La siguiente etapa de pruebas consistió en colocar esta vez, un par de detectores sobre el soporte giratorio, para simular la desviación del apuntamiento del satélite en un eje. En el piso se colocó un disco de aluminio de 70 cm de diámetro, calentado a 45 grados centígrados para simular la tierra. Los resultados se muestran en la figura 2.21.

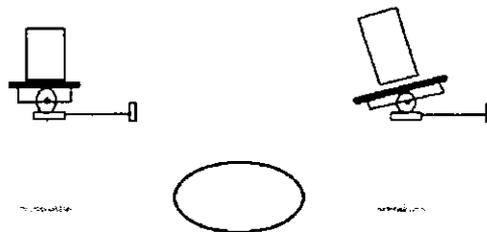


Figura 2.20. Dispositivo utilizado para simular el efecto de inclinación de uno de los ejes del satélite.

La resolución obtenida en este sensor es del orden de ± 0.5 grados, con lo que se ha conseguido el objetivo planteado al inicio del proyecto. En la figura siguiente se muestra una curva típica de respuesta.

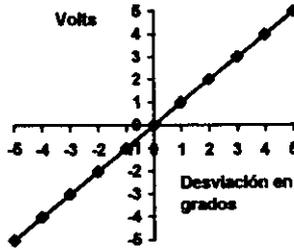


Figura 2.21 Pruebas de desviación de apuntamiento en un eje.

2.4.-Interfaces con el microcontrolador

Las señales obtenidas de los sensores deben ser procesadas previamente por la electrónica de acondicionamiento, antes de ser enviadas a la computadora de a bordo. Los ajustes y cambios que se llevan a cabo son: el control de ganancia, el desajuste de corriente directa (offset) y la comparación de las señales en cada par de detectores (por cada eje detectado). Dichos ajustes se llevan a cabo con la utilización de amplificadores operacionales.

2.4.1.- Circuitos de acondicionamiento de señales.

La ganancia de las señales puede ser obtenida en cada etapa de amplificación, sin embargo es conveniente que la primera de ellas funcione como un aislador, con baja ganancia. Es necesario ajustar los valores de voltaje a la entrada de la interfaz, debido a las pequeñas variaciones de respuesta de cada uno de los detectores involucrados, así por ejemplo, la señal de corriente proveniente de una celda solar, es necesario conectarla a un convertidor de corriente a voltaje, etc.

Tomando en cuenta que el prototipo de sensor de tierra presenta respuestas no lineales, y que las celdas del detector de sol sufrirán variaciones en su respuesta durante su operación en órbita; la determinación de la orientación correcta deberá hacerse en forma digital por comparación de una tabla de respuesta previamente ajustada a las lecturas de los sensores. Dada la redundancia del eje de cabeceo, cuando sea posible es preferible tomar la lectura del sensor de sol, pues su linealidad le permite proporcionar lecturas más confiables. En el apéndice C se muestran los diagramas utilizados para ambos sensores.

2.4.2.- Interfaz con el microcontrolador.

En la figura 2.25 se muestra el diagrama de bloques de la interfaz al microcontrolador, necesaria para la conexión de las señales provenientes de los sensores.

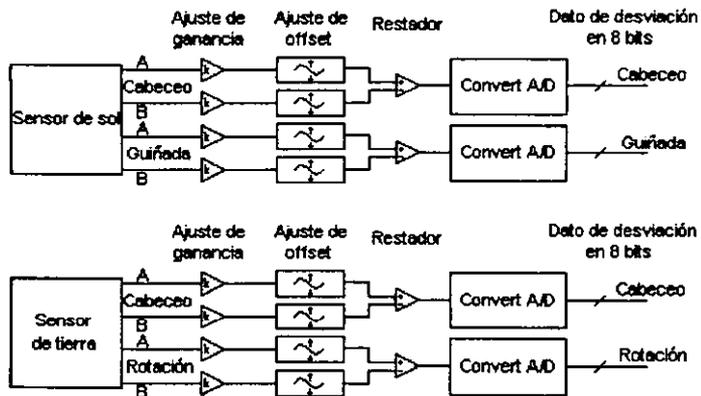


Figura 2.2 Diagrama de bloques de la interfaz sensores-microcontrolador.

□.

CAPÍTULO III

FILTRADO DIGITAL DE SEÑALES

En la adquisición de datos de un sistema que va a ser controlado, es necesario asegurar que la información recibida sea confiable para que el proceso de control se realice adecuadamente. La señal de entrada puede estar influenciada por muchas fuentes de ruido, éste es producido por factores propios o ajenos a la electrónica utilizada o aledaña a los sensores. En los sensores de orientación, la desviación del valor real de dichas señales puede ser provocada por factores de ambiente en el que se encuentran trabajando estos dispositivos, tales como incidencia de radiación, tormentas electromagnéticas, ruido inducido por corrientes cercanas, transitorios por vibraciones, etc. Por todas estas razones, resulta obvio que se requiere un método para eliminar las señales espurias en el sistema, ya que la presencia de ruido resulta un inconveniente para la etapa de control, puesto que la señal de entrada es una referencia de la posición.

Las exigencias en un ambiente orbital dificultan las cosas. Los filtros analógicos son vulnerables a esta situación. En estas condiciones, los circuitos electrónicos son susceptibles a fallas por causa de la radiación a la que son expuestos y a la variación de temperaturas a la que son sometidos. La telemetría del sistema de comunicaciones es otro factor de riesgo para la operación de los filtros y otros circuitos, debido a la emisión electromagnética que están produciendo. Ante la eventualidad de alguna falla en un circuito, los filtros analógicos no pueden ser modificados en órbita, en cambio, los filtros digitales sí pueden reprogramarse al enviarse por comandos un nuevo programa, esto los hace más fáciles de manejar y modificar. Por ello, es utilizado un sistema de filtrado digital, que no es más que un programa dedicado a discriminar las frecuencias no deseadas en los datos adquiridos, que provocan efectos adversos para los propósitos de procesos posteriores. La calidad de la señal a la salida del filtro mejora notablemente puesto, que lo que obtenemos es una señal limpia a partir de las señales de entrada con ruido.

Una buena elección del método de filtrado es indispensable para que se ajuste a las capacidades del lenguaje de programación y del equipo que lo soportan. Muchos de éstos métodos ofrecen capacidad operativa, pero son exigentes con los recursos del sistema con los cuales funciona. Así pues, existen filtros digitales simples con requerimientos exigentes de memoria, múltiples operaciones y demasiado tiempo de proceso. También los hay con manejo de pocos recursos de programación y equipo, pero con una complicada implementación según las variables consideradas[9]. Existen muchos métodos disponibles para ser utilizados como eliminadores de ruido, incluso hay algunos que se especializan en la predicción de valores. Éstos últimos son utilizados para sistemas en los cuales se necesita saber con anticipación un valor estimado según el estado de los valores actuales.

3.1.- Filtrado, estimación y ajuste a una curva de segundo grado.

Los métodos de reducción del ruido son variados, sin embargo, funcionan con principios similares. La técnica de filtrado de señales opera bajo la regla de tomar el promedio de las lecturas, es decir, tomar una cantidad de datos, asignar un peso a cada una de las muestras (multiplicar por coeficientes calculados) y sumarlos, para posteriormente dividirlos entre el número de muestras tomadas. Para ello pueden utilizarse datos directos de la entrada o datos tomados de resultados anteriormente calculados. A este tipo de procedimientos se le conoce como filtrado no recursivo y filtrado recursivo respectivamente, y la forma de operación se observa en la figura 3.1.

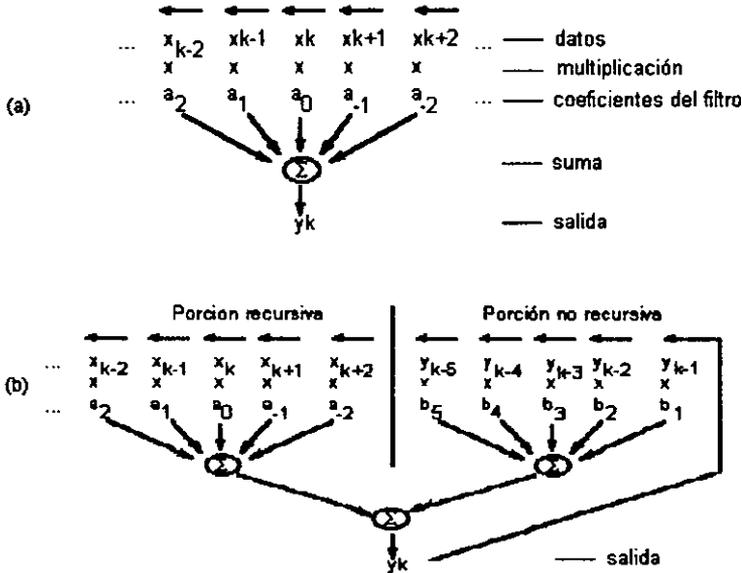


Figura 3.1. Esquema de la operación de un filtro digital (a) no recursivo (b) recursivo.

El método de estimación se basa en la predicción de los posibles valores que tomará una señal, a partir de los últimos valores de entrada. Si se desea que la señal de entrada sea procesada para conocer una estimación del valor futuro, se deben aplicar técnicas matemáticas y probabilísticas. Así, un método muy utilizado en la estimación de señales es el denominado filtro Kalman[9]. Aunque no es un filtro estrictamente hablando, sino un estimador, se obtienen resultados similares. La diferencia radica en que en el filtrado se procesa un conjunto de datos de entrada para generar un valor filtrado, en sustitución del último dato obtenido. De hecho, a lo largo de este trabajo se le denominará filtro a todo proceso de eliminación de ruido, independientemente del método utilizado.

Un estimador procesa la señal en función de los últimos datos de entrada y genera una estimación del valor que posiblemente tomará el siguiente dato. La desventaja de éste último método es que se necesitan conocer las condiciones de trabajo de la señal de entrada, es decir, no es suficiente determinar una frecuencia de corte, sino el

comportamiento de las variables del sistema considerado, para poder aplicar el diseño del estimador por medio de procesos estocásticos de predicción.

El método utilizado para el desarrollo de este trabajo es el de ajuste de datos a una curva. La concepción del método es bastante sencilla y efectiva, por lo que para su utilización en el sistema de adquisición de datos de orientación, es conveniente su implementación. El método consiste en la búsqueda de una curva de cierto orden a la cual se ajusten los datos adquiridos. El ajuste se realiza minimizando el cuadrado de la distancia de cada uno de los puntos a la curva. La representación de la curva se lleva a cabo por medio de una ecuación de grado tal, que convenga al diseño. Esta puede ser de primer grado (recta) o grados subsecuentes. El proceso de la señal se complica para curvas cuyas ecuaciones son de altos grados, puesto que el diseño involucra mayor número de operaciones.

3.1.1.- Diseño de un filtro con ajuste a una curva de segundo grado por el método de mínimos cuadrados

Para un conjunto de datos, es necesario determinar cual es el mejor ajuste a una ecuación de grado conocido. El método utilizado busca cuales son los coeficientes que se deben aplicar a una ecuación de segundo grado para posteriormente calcular el ajuste del último valor obtenido de la serie de datos.

A continuación se explica el procedimiento de diseño del filtro con ajuste a una curva de segundo grado.

Consideramos un error definido por $y(x_i) - y_i$ llamado e_i , para una $i = 1, 2, 3, \dots, M$. Este error es considerado el ruido de la señal de entrada, por lo que se dice que la señal corregida corresponde a la curva a la que se quiere ajustar. Para cada una de las muestras existe un error hacia el valor de la curva. Como el método exige minimizar los errores de las muestras a los puntos de la curva, se toma el cuadrado del error. Con ello aseguramos que se obtengan valores positivos que cuya suma se minimizará. Además la minimización de la suma de los errores por igualación a cero de su derivada, exige que se considere el

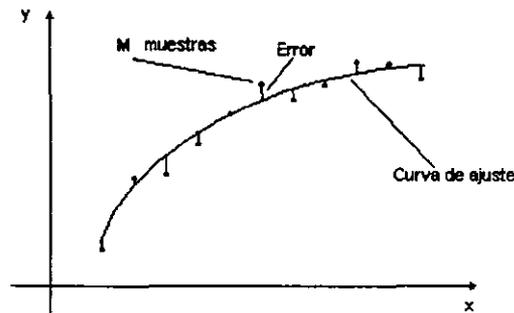


Figura 3.2. Ajuste de M muestras a una curva.

cuadrado de los errores, pues en el proceso no se elimina la variable con respecto a la cual se deriva. Esto es:

$$\sum_{i=1}^M \varepsilon_i = \sum_{i=1}^M [y(x_i) - y_i]^2$$

Si la curva a la que se van a ajustar los valores de las muestras están definidos por una curva de segundo grado, entonces la ecuación que la define está dada por

$$y(x_i) = a + bx_i + cx_i^2$$

Dado que los coeficientes a , b y c son desconocidos para obtener la ecuación, se requiere igualar a cero cada una de las derivadas parciales con respecto a cada uno de los coeficientes considerados en la ecuación

$$F(a,b,c) = \sum_{i=1}^M [y(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=1}^M [a + bx_i + cx_i^2 - y_i]^2$$

$$\frac{\partial F}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^M [a + bx_i + cx_i^2 - y_i] = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^M [a + bx_i + cx_i^2 - y_i] x_i = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^M [a + bx_i + cx_i^2 - y_i] x_i^2 = 0$$

$$a \sum 1 + b \sum x_i + c \sum x_i^2 = \sum y_i \quad ; \quad aM + b \sum x_i + c \sum x_i^2 = \sum y_i M$$

$$a \sum x_i + b \sum x_i^2 + c \sum x_i^3 = \sum y_i x_i$$

$$a \sum x_i^2 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^4 = \sum y_i x_i^2$$

y simplificando la notación

$$\begin{aligned} Ma + Nb + Oc &= R \\ Na + Ob + Pc &= S \\ Oa + Pb + Qc &= T \end{aligned}$$

donde $M =$ número de muestras

$$N = \sum x_i$$

$$O = \sum x_i^2$$

$$P = \sum x_i^3$$

$$Q = \sum x_i^4$$

$$R = \sum y_i$$

$$S = \sum y_i x_i$$

$$T = \sum y_i x_i^2$$

Con el sistema de ecuaciones de tres incógnitas (a , b y c), es posible encontrar los coeficientes de la ecuación de segundo grado, especificando el número de muestras de entrada. Dado un número de muestras de entrada para ser filtradas, la variación entre los valores de los puntos es suavizada encontrando la curva de ajuste. Es por ello que se dice que el ruido es la distancia de los puntos de la curva a su correspondiente muestra. Para un número bajo de muestras, el ruido de la señal de entrada tiene mucha trascendencia a la salida del filtro, esto es, la curva es ajustada con pocos datos y sufrirá en mayor grado la variación en el valor de cada una de las muestras. En el caso contrario, con un número muy grande de muestras, el ajuste a una curva de segundo grado es más forzado que con un número de muestras no tan grande. Es por ello que variando el número de muestras se ajusta también la frecuencia de corte de operación del filtro. Ésta última característica es importante en la elección del método de filtrado, puesto que sólo es necesario modificar un parámetro para ajustar la frecuencia de corte en las pruebas de un sistema futuro, con características dinámicas indeterminadas.

El proceso de implementación de un filtro por ajuste a una curva, fue desarrollado conforme a la necesidad de encontrar un valor preciso del último dato adquirido, es decir, se encuentran los valores de los coeficientes de la ecuación que definen la curva, para evaluar de acuerdo a la últimas m muestras adquiridas. Con ello se logra obtener un valor corregido desplazado en el tiempo. Para un periodo de muestreo pequeño no es significativo el retardo en el ajuste del dato, puesto que las frecuencias de interés son de bajo valor. A continuación se presentan algunos ejemplos de la utilización del filtro digital desarrollado para este trabajo de tesis.

En la figura 3.3 se observa una representación gráfica del proceso de actualización de los valores ajustados.

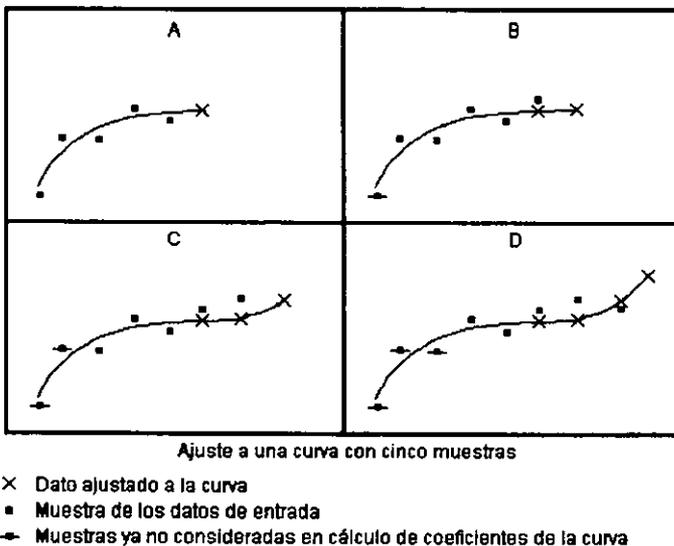


Figura 3.3. Construcción de una curva irregular con ajuste a curvas de segundo grado.

El valor de los puntos calculados depende de la tendencia general de los puntos de las muestras. El seguimiento se asegura al minimizar las distancias de cada uno de los puntos a la curva.

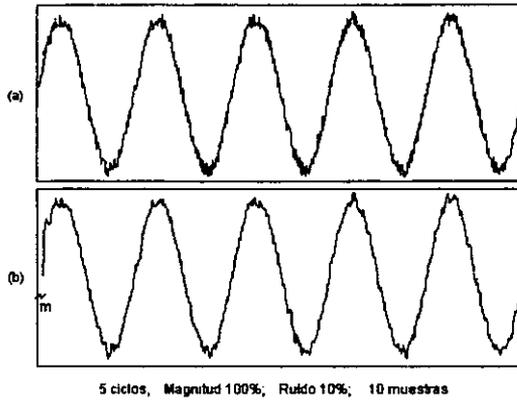


Figura 3.4. Aplicación del filtro con ajuste a una curva de segundo grado con 10 muestras a una señal senoidal con 10% de ruido; (a) entrada al filtro y (b) salida del filtro.

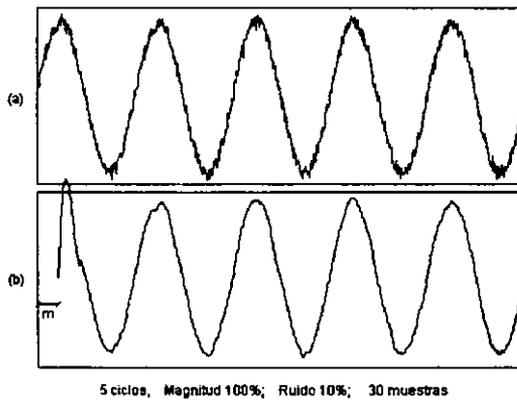


Figura 3.5. Aplicación del filtro con ajuste a una curva de segundo grado con 30 muestras a una señal senoidal con 10% de ruido; (a) entrada al filtro y (b) salida del filtro.

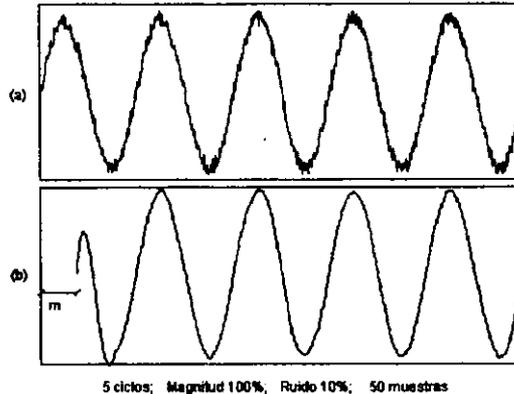


Figura 3.6. Aplicación del filtro con ajuste a una curva de segundo grado con 50 muestras a una señal senoidal con 10% de ruido; (a) entrada al filtro y (b) salida del filtro.

La inclusión de la forma de onda senoidal en el programa de filtrado se generó de forma artificial, con amplitud y frecuencia variables y magnitud de ruido ajustable en diferentes porcentajes. De la señal de entrada es tomada una cierta cantidad de valores (diez muestras por ejemplo, como en la figura 3.4); por esta razón el primer punto calculado, se aleja del valor de la señal de entrada, una cantidad de muestras m . Los siguientes puntos son continuos con separación de tan sólo una muestra. En la figura 3.5, al inicio de la señal filtrada, la forma senoidal se distorsiona puesto que no se tiene aún la suficiente información. A medida que el filtrado se lleva a cabo y el proceso se cumple periódicamente a baja frecuencia, se tiende a seguir a la señal original. El efecto de distorsión al inicio no se considera un inconveniente, puesto que la pruebas finales en la adquisición de datos de los sensores de orientación, generan un número ilimitado de valores por su carácter de muestreo ininterrumpido durante toda la misión.

3.2.- Selección del lenguaje de programación

El desarrollo de un filtro digital exige hacer prototipos de programación de fácil estructura para ser modificado. Para ello se requiere trabajar con una herramienta amigable, con la capacidad de cambiar fácilmente los detalles de funcionamiento. El tipo de lenguaje que se seleccionó para llevar a cabo los procesos de filtrado, y en general todo el proceso de detección de orientación y control de estabilización, es el lenguaje C; que siendo un lenguaje de nivel intermedio, permite tanto el manejo de funciones preconstruidas, como la manipulación directa de bits, bytes y registros de memoria en los microprocesadores. Esto nos permite una gran facilidad en el manejo de operaciones, gráficos y comunicación a periféricos.

El proceso de filtrado digital se aplicará directamente a todas las señales provenientes de los sensores de orientación. Tal tarea se llevará a cabo en un microcontrolador (68HC11)[5,7] de ocho bits. El desarrollo de la programación se elaboró en un medio más amigable, como lo es una pc trabajando con un lenguaje de nivel intermedio. Una vez probado el funcionamiento del mismo, se llevó a cabo la conversión de lenguaje C, al lenguaje ensamblador del microcontrolador.

3.3.- Tipo de microcontrolador y características operativas

La operación de adquisición de datos, filtrado y control se realiza en un microcontrolador, lo que permite la disminución de espacio, masa y energía. Las funciones que permite llevar a cabo un sistema instrumentado con un microcontrolador son muy variadas y flexibles, esto hace muy conveniente su utilización. Otorga la posibilidad de manejar datos en puertos de entrada y salida, la ampliación de memoria para casos de programas elaborados, en ocasiones la posibilidad de comunicación serial con otros equipos, velocidades de operación en el orden de los megahertz y variedad de operaciones aritméticas ya incluidas.

Los requisitos que impone el sistema de adquisición se ajustan a los recursos ofrecidos por estos dispositivos, por tanto, la elección del microcontrolador a utilizar depende de la calidad y cantidad de funciones y costo del sistema. En el mercado existen muchos tipos de microcontroladores con características especiales para cada aplicación. Entre los más comerciales se encuentran el 68hc11 de Motorola, el 8096 de Intel, la serie AT89xxx de Atmel, etc.

La facilidad de manejo del 68HC11A1 y los recursos desarrollado alrededor del mismo, lo hacen el más adecuado para el sistema de adquisición de datos de los sensores. Contiene un procesador de 8 bits con registros que nos pueden entregar el resultado de multiplicación hasta con 16 bits. Contiene dos acumuladores de 8 bits que operan independientes o unidos como uno sólo a 16 bits. Cuenta con dos registros de índice para referenciar rápidamente el direccionamiento a localidades de memoria. La frecuencia de trabajo máximo en el bus local es de 2 Mhz. Cuenta con un puerto paralelo de 8 bits de entrada/salida programable, un puerto paralelo de 8 bits de sólo salida, un puerto de entrada con 4 canales con convertidor analógico a digital con capacidad de 8 bits y un direccionamiento de memoria total de 64 kbytes[5].

Casi todos los recursos del microcontrolador son utilizados, aunque no a su máxima capacidad, por el sistema de adquisición de datos; ya que se requiere de la comunicación con la pc, adquisición y salida de datos por puertos, la explotación de las operaciones aritméticas internas y el uso de memoria externa en modo expandido.

3.3.1.- Modo de operación del microcontrolador

La forma de trabajo del 68HC11A1 para el sistema de adquisición de datos exige la implementación de memoria externa, para llevar a cabo rutinas de punto flotante específicamente. Ello es posible puesto que el microcontrolador permite trabajar en varios ambientes y utilizando diferentes recursos de trabajo que convienen para alguna aplicación. Ellos son básicamente el llamado modo "chip sencillo" y modo "expandido", cada uno de estos modos se subdividen en normal y especial.

El programa utilizado para cargar los programas desde la pc hacia el microcontrolador es el llamado Pcbug11, y trabaja en modo "chip sencillo especial" o modo "bootstrap"; con este programa es posible cargar los programas en lenguaje de máquina utilizado en el 68HC1A1, directamente a la memoria del chip, comunicado por el puerto serie asíncrono. Los programas previamente son ensamblados por otro paquete llamado **lasm11**, que cuenta con un editor que revisa los errores del programa antes de ser salvado como archivo de lenguaje de máquina. El archivo generado en lenguaje de máquina es guardado con extensión S19 y contiene los códigos del programa en hexadecimal. La gran

ventaja del paquete Pcbug11, es que puede acceder a la memoria interna del 68HC1A1 y puede ser leída y modificada directamente.

La configuración del modo de operación es determinada por el estado de las terminales 24 y 25 del microcontrolador llamadas modo B y modo A respectivamente. La tabla del modo de operación del microcontrolador[5,7] es función de los estados de tales señales como se muestra en la tabla 3.1.

Modo de operación	Modo A	Modo B
Chip simple normal	0	1
Chip simple especial	0	0
Expandido normal	1	1
Expandido especial	1	0

Tabla 3.1. Configuración de los modos de operación para el 68HC1A1.

El modo chip sencillo utiliza los recursos internos del microcontrolador, por lo que es autosuficiente para su operación y no requiere de circuitería externa auxiliar para el proceso de datos. Para el modo especial en chip sencillo se dota al microcontrolador con un sistema de carga de programas y de datos en su memoria interna. Se configura automáticamente el puerto serie para comunicación con una pc y un programa de envío de datos, configurado con el mismo protocolo e instrucciones de manipulación de bits, completa la transferencia de datos desde y hacia la memoria del microcontrolador. El modo expandido normal es utilizado para la implementación de memoria externa. Durante la expansión de memoria se utilizan dos puertos paralelos para conectar el bus de direcciones y el bus de datos. El bus de direcciones cuenta con 16 bits y ocupa dos puertos paralelos de salida, pero la parte baja (ocho bits) es compartida por el bus de datos, multiplexados en tiempo. La señal que indica el envío o recepción de un dato y el envío de la parte baja del bus de direcciones, es generada por la pata 26 del microcontrolador llamada Address Strobe. El modo expandido especial es utilizado para mostrar y realizar pruebas de fábrica, por lo que generalmente el usuario no se interesa por tal modo de operación.

El microcontrolador cuenta con registros internos que determinan la configuración de los recursos. Ellos se localizan en el mapa de memoria, direccionados desde la localidad 1000_H hasta 103F_H, y se dividen en registros de puertos de propósito general (desde 1000_H hasta 100A_H), registros de temporizado e interrupciones (desde 100B_H hasta 1027_H), registros de comunicación serial síncrona (desde 1028_H hasta 102A_H), registros de comunicación serial asíncrona (desde 102B_H hasta 102F_H), registros del convertidor A/D (desde 1030_H hasta 1034_H) y registros de configuración (desde 1039_H hasta 103F_H). Las direcciones no comprendidas entre estos registros son reservadas y no pueden ser utilizadas en ninguna aplicación.

La configuración de los registros internos son importantes en cada uno de los modos de operación del microcontrolador, puesto que al presentarse una señal de restablecer (reset), el modo de funcionamiento determina su valor. Así pues, para configurar la comunicación serial con la computadora a 9600 bauds, el registro de comunicación serial asíncrona en la dirección 102B_H (generador de baudaje del SCI) tomará el valor de 30_H.

Programación e implementación en el microcontrolador

La programación del microcontrolador se lleva a cabo de la siguiente manera: en él se construyen las instrucciones que serán utilizadas para realizar cálculos, y manejar los recursos internos y periféricos del sistema. Antes de trabajar con el lenguaje de máquina o ensamblador en forma hexadecimal, es conveniente utilizar una nomenclatura que represente una instrucción comprensible al usuario. En el apéndice B se describen los modos de operación mas utilizados en el microcontrolador HC11x, y se muestra el diagrama de flujo del programa de ajuste por mínimos cuadrados.

□.

CAPÍTULO IV

RUTINA DE GRAFICACIÓN Y DESPLIEGUE

4.1.- Necesidades de visualización

El sistema de sensores, produce datos que representan la orientación de la plataforma de simulación en tres ejes ortogonales. La lectura de la orientación en los tres ejes se obtiene numéricamente al convertir los valores de voltaje de los sensores a un valor hexadecimal y en el laboratorio puede verse directamente la orientación física de la plataforma; sin embargo, se requiere de un despliegue visual de estos datos, ya que cuando el satélite se encuentre en órbita, obviamente éste no se encontrará a la vista y por tanto, será mucho más fácil observar la orientación en tierra con la ayuda de un monitor y de esta manera saber si se han estado llevando a cabo correctamente las maniobras de orientación. Para ello es utilizado un sistema de graficación en PC como herramienta de despliegue de datos y simulación de orientación.

El programa de graficación presentado en este trabajo es una herramienta utilizada como medio auxiliar para comprobar el funcionamiento del sistema de adquisición de datos. Para comprender su funcionamiento, se explican a nivel de diagrama de flujo, los puntos más importantes de la estructura del mismo y el menú de funciones para ajustar una simulación gráfica a los requerimientos de visualización, dados los datos de entrada. En el apéndice C se muestra el listado de esta rutina.

El programa fue escrito en lenguaje C++ por ofrecer una gran flexibilidad para el manejo de gráficos y manejo de puertos. Cuenta con la opción de inicializar la posición del objeto en la pantalla por medio del teclado, de tal suerte que los datos recibidos del puerto serie son actualizados constantemente en la gráfica a partir de una referencia inicial.

Permite también establecer la dirección de visualización del objeto, esto será muy importante en órbita debido a que podremos simular al satélite visto desde el sol o desde la tierra. Básicamente se puede seleccionar un punto de partida para cada uno de los ejes y el punto de vista del observador. El objeto es introducido desde un archivo, el cual contiene los vértices y se definen las caras que lo forman.

Los datos del microcontrolador se envían a la PC en forma serial asíncrona, esta comunicación se lleva a cabo a través del puerto COM 1 a una velocidad de transmisión de 9600 bauds. La información recibida contiene datos de los tres ángulos de desviación, los cuales son diferenciados por medio de un protocolo de comunicación simple; sólo se reciben datos, lo que permite enviarlos en forma ordenada después de una palabra de control. Ésta última se utiliza para indicar a la computadora el momento en el cual se inicia el envío del dato de guiñada, seguido de dato de cabeceo, y por último el de rotación, para comenzar nuevamente enviando la palabra de control. El valor de ésta última es

seleccionado como 00_H, considerando un byte de dato hexadecimal sin signo. Dado que se encuentra en la base del sistema de numeración, la palabra de control no estorba a las lecturas intermedias de los datos de interés. Esto exige entonces que un dato de información igual a 00_H a la salida del filtro, se le asigne un valor de 01_H al salir del puerto serie, puesto que de conservar su valor inicial, se perdería la sincronía con la recepción en la computadora, al confundir un dato con la palabra de control. El error en la lectura en el cambio de valor no es de trascendencia, puesto que sólo se recorre 0.2° al final de la escala de detección del sensor (de sol o de tierra), zona de trabajo donde no se lee frecuentemente, ya que nominalmente ambos sensores deben apuntar al centro de la escala.

4.2.- Diagrama de flujo

El programa se desarrolló con la ayuda de rutinas auxiliares, que permiten el acceso rápido de funciones especializadas de graficación, cálculo de rotación de objetos, apertura de archivos con información de los vértices del objeto, etc. Este tipo de rutinas, están indicadas por el diagrama de flujo con la representación Función.

Antes de comenzar a trabajar con el programa de graficación, se requiere declarar algunas de las variables más importantes (ver figura 4.1), tal como los datos de ángulos de desviación, intervalos de funcionamiento de los sensores (expresados en grados) y demás variables. También se incluyen los programas auxiliares que permiten la creación de un ambiente gráfico en tres dimensiones, el manejo de menús en modo gráfico, etc. La inicialización del puerto serie se refiere a la configuración del programa para trabajar a 9600 bauds por el puerto COM 1, con sólo recepción de datos.

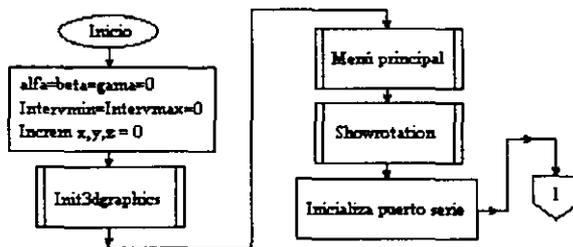


Figura 4.1. Inicio del diagrama de flujo del programa de graficación; declaración de variables, inclusión de programas alternos y configuración del puerto serial.

El flujo posterior del programa se lleva a cabo de forma cíclica. Las condicionantes permiten determinar si el dato a actualizar en la posición del gráfico proviene del teclado (para hacer una simulación), o bien, proviene del puerto serial como dato directo del sensor (ver figura 4.2).

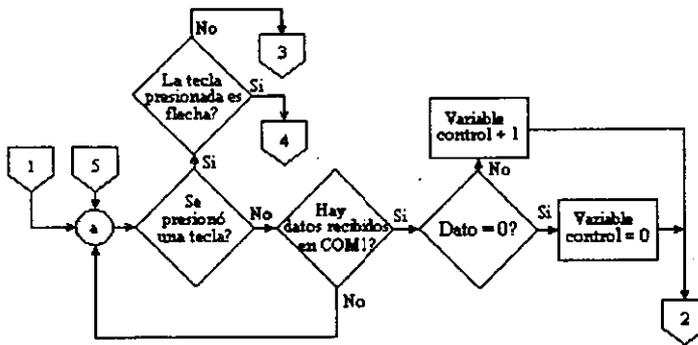


Figura 4.2. Condicionantes del diagrama de flujo del programa de graficación que determinan la operación según el origen de los datos de entrada.

El proceso de discriminación de los datos provenientes de la transmisión se efectúa de acuerdo con el valor asignado a la variable control, la cual conmuta la operación de cálculo de la variable de desviación con su correspondiente valor recibido. Ello se realiza con condicionantes según el estado de la variable de control como lo muestra la figura 4.3.

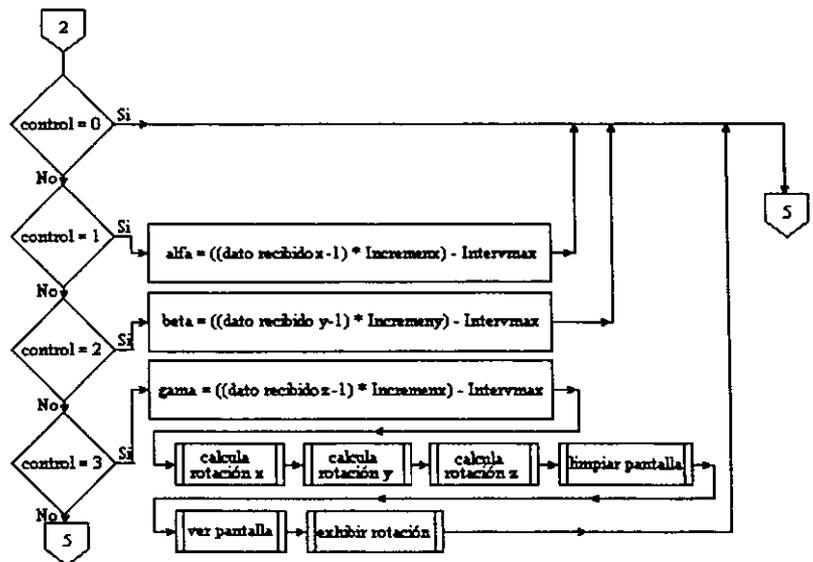


Figura 4.3. Selección de los cálculos de los datos provenientes de la comunicación serial con el microcontrolador.

La selección de los valores de la desviación en la rotación por medio del teclado se asigna con incrementos en alguna dirección según la flecha que se oprima. Tal información es actualizada para el cálculo de los vértices del objeto en un eje de rotación preestablecido (figura 4.4).

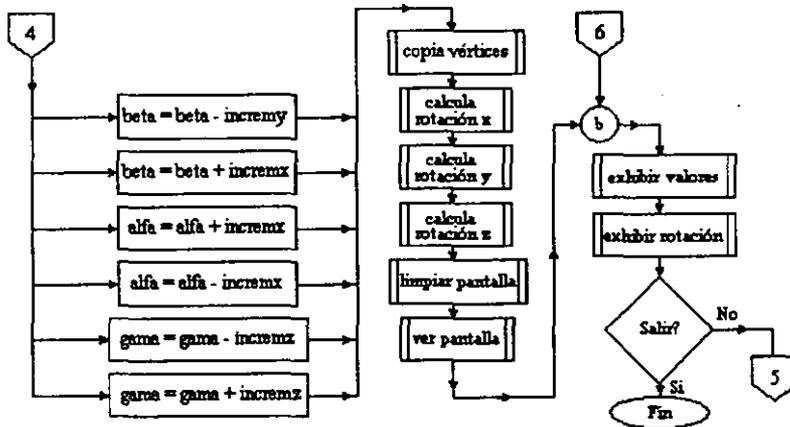


Figura 4.4. Operación de actualización de valores de posición de acuerdo a incrementos con el teclado.

Los intervalos de operación en la visualización son seleccionados en un menú alterno al cálculo en la actualización de los vértices. Mediante este menú es invocado el archivo que contiene al objeto de trabajo, determina los incrementos utilizados para la rotación mínima en cualquiera de los ejes de desviación, así como el punto de vista del observador en tres dimensiones. Cada una de las funciones del menú es realizada por programas auxiliares, especializados cada uno en la lectura de archivos e interpretación de los datos para el cálculo de los vértices del objeto y vista del mismo (figura 4.5).

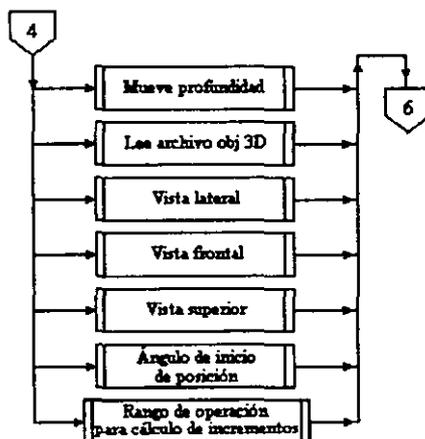


Figura 4.5. Flujo del menú de actualización de operación

La imagen visualizada en la pantalla al correr el programa corresponde entonces a la orientación señalada por los sensores. En la figura 4.6 se muestra el aspecto del objeto sin desviación alguna.

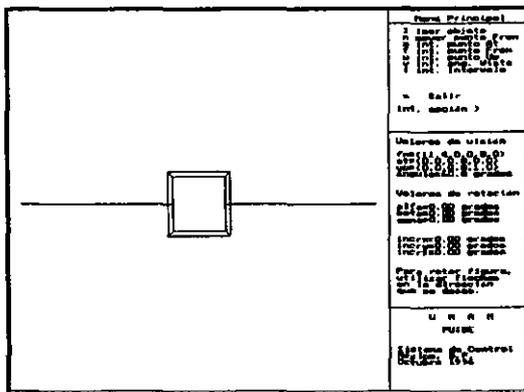


Figura 4.6. Visualización de la pantalla del programa de simulación, sin desviación ($\alpha=\beta=\gamma=0$)

En la figura 4.7 se muestra la vista en tres dimensiones con el menú de valores de desviación e incremento. Ésta es la máxima desviación en cada uno de los ejes, es decir alfa, beta y gamma con un valor de 25.6° cada uno. Los valores intermedios de posición son determinados por el teclado o por la adquisición de datos enviados por el puerto serial.

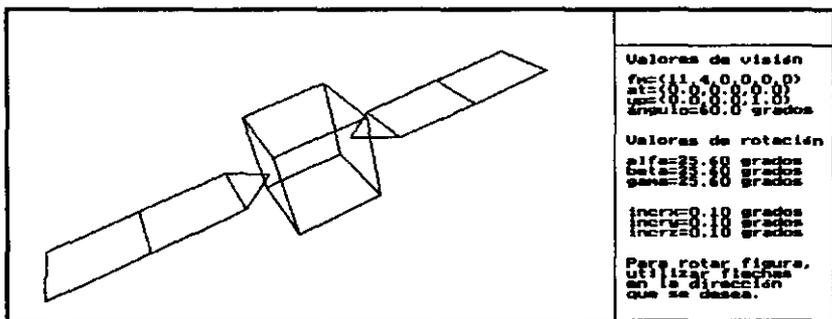


Figura 4.7. Vista del objeto con una desviación máxima dados los intervalos de operación de los sensores.

CAPÍTULO V

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE DETECCIÓN DE ORIENTACIÓN

Pruebas con el sistema de detección de orientación

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos durante diferentes pruebas de detección de orientación en el laboratorio. Para la realización de estos experimentos, se utilizó como plataforma de integración y pruebas; un simulador físico que provee de un medio sin fricción, que como se había mencionado, simula una de las condiciones más importantes desde el punto de vista dinámico, la falta de fricción. Este simulador constituye la parte medular, en cuanto a infraestructura física de simulación se refiere, de el proyecto de sistemas de detección de orientación y control de estabilización de satélites pequeños, que se desarrolla en el laboratorio de control del Programa Universitario de Investigación y Desarrollo Espacial de la UNAM, que es donde se llevó a cabo este trabajo de tesis.

Antes de llevar a cabo la integración de los componentes, se llevaron a cabo diferentes pruebas de funcionamiento y calibración en la programación, en la circuitería, en los sensores y demás componentes del sistema de detección de orientación. Una vez comprobado el funcionamiento de los elementos separados, se fueron conectando y probando hasta lograr el funcionamiento de todo el conjunto. Para poder llevar a cabo las primeras pruebas de funcionamiento de este sistema, se realizó un balanceo estático de la plataforma, una vez que se montaron todos los componentes, se colocaron diferentes masas para que la plataforma estuviera lo más balanceada posible y evitar así movimientos bruscos debido a que en un medio sin fricción, causa movimientos importantes. Por otro lado, se tuvieron algunos problemas con la respuesta de los sensores, debido a reflejos luminosos que no era posible evitar por las condiciones del laboratorio en donde se llevaron a cabo las pruebas, pero una vez superadas estas pequeñas dificultades, éstas pudieron realizarse.

Diagrama de bloques del sistema

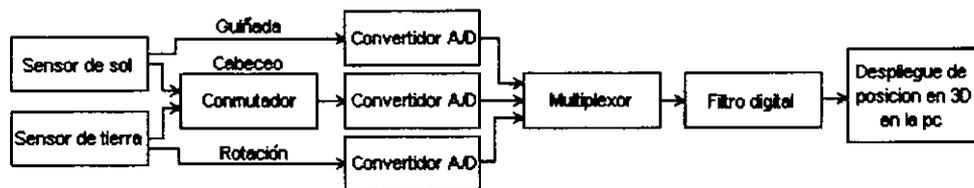


Figura 5.1 Diagrama de bloques donde se muestra la conexión de los diferentes componentes del sistema de detección de orientación.

Curvas de respuesta de los sensores.

Para el sensor de sol se cuenta con una cobertura de ± 12.5 grados cubriendo los ejes de rotación y cabeceo, el intervalo de voltaje es de 0 a 5 volts que es el que maneja el convertidor de 8 bits integrado al microcontrolador, con esto se logra obtener una resolución de ± 0.1 grados en cada uno de los ejes. Las pruebas de respuesta se realizaron en una mesa que permite la inclinación en un solo eje, por lo que fue necesario calibrar cada uno de ellos en pruebas diferentes. La curva de respuesta se muestra en la siguiente figura.

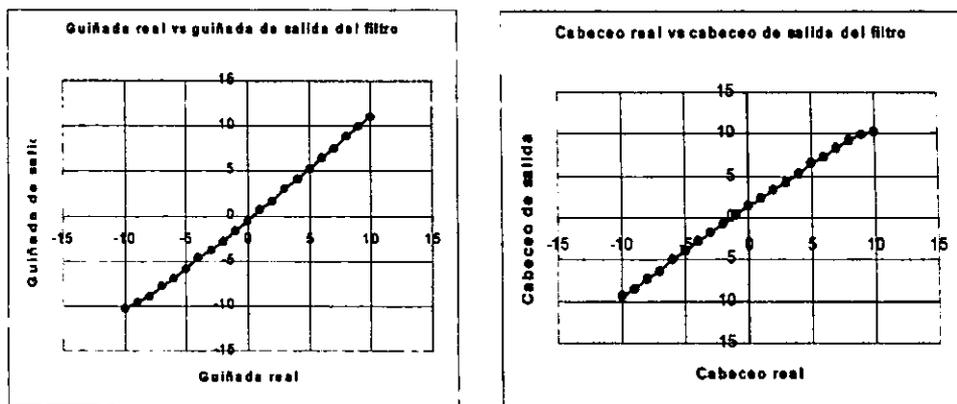


Figura 5.2 Curvas de respuesta del sensor de sol en los ejes de cabeceo y guiñada.

El sensor de tierra tiene una cobertura de ± 20 grados en cada uno de los ejes de cabeceo y guiñada, la señal se acondicionó también en el intervalo de 0

a 5 volts, para dar una resolución de ± 0.1 grados. Las curvas de respuesta se muestran en la siguiente figura.

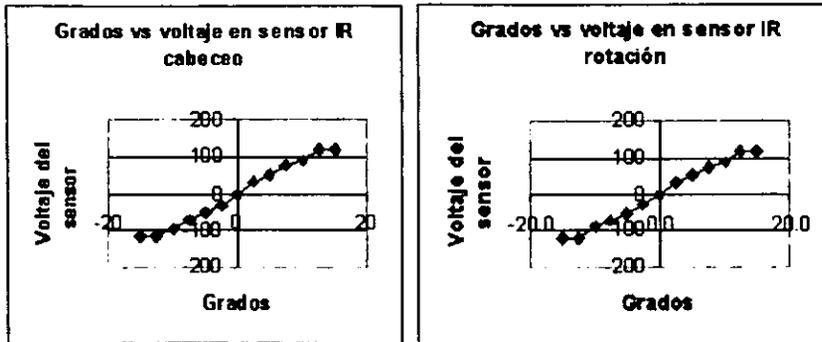


Figura 5.3 Curvas de respuesta del sensor de tierra en los ejes de rotación y cabeceo.

Pruebas de detección de orientación.

Para llevar a cabo la primera serie de pruebas de detección de orientación se montó en un cuarto oscuro un arreglo similar al mostrado en la figura 5.4 En la parte superior se colocó una lámpara conectada a una fuente de voltaje regulada para evitar variaciones en la intensidad luminosa y los subsecuentes problemas de calibración. En la plataforma se montaron los componentes principales del sistema de detección de orientación a saber: sensores de sol y tierra, electrónica de acondicionamiento y amplificación y el microcontrolador. Variando la posición de la plataforma manualmente fue posible observar en el monitor el despliegue numérico de la desviación en grados de los tres ejes del sistema, asimismo se visualizó por medio de una gráfica el movimiento también en tres ejes de la plataforma, véase la figura 5.5.

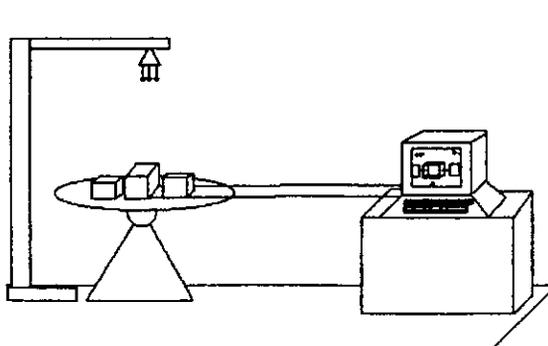


Figura 5.4 Montaje del experimento de detección de orientación en la plataforma de simulación.

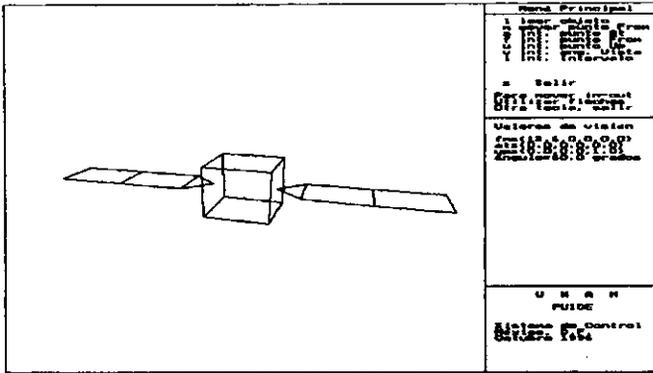


Figura 5.5 Monitor de la PC donde se despliegan los datos tanto numéricos como gráficos del sistema de detección de orientación.

La detección de orientación ha sido realizada de manera satisfactoria, en el capítulo seis, se hace un resumen de los principales resultados de este trabajo y se hacen algunas recomendaciones para el mejoramiento y continuación del proceso de detección de orientación para satélites pequeños.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

De la presente tesis se puede concluir que:

- Se diseñó, construyó y probó un sistema de detección de orientación de satélites pequeños, en base a un sensor de sol y un sensor de tierra; lo cual permite determinar el apuntamiento en tres ejes de rotación, utilizando referencias visuales de cuerpos con modelos dinámicos predefinidos.
- La orientación en tres ejes de un satélite, se determina conociendo los ángulos de apuntamiento y las velocidades angulares respectivas. El trabajo realizado es complemento de un sistema completo de detección de orientación y se asume que se requieren más dispositivos que, por una parte, aseguren redundancia en las lecturas de desviación en todos los ejes; y que por otra, proporcionen las velocidades angulares (giróscopos, bobinas magnéticas, acelerómetros, etc).
- Se desarrolló y probó un sistema para detección de orientación basado en el apuntamiento al vector solar con celdas solares, el cual proporciona la información de desviación en los ejes de guiñada y cabeceo, con una precisión de ± 0.1 grados, dados por la resolución del convertidor A/D y la cobertura de visión de ± 12.8 grados por eje.
- Así mismo, se desarrolló y probó un sensor de tierra en el infrarrojo térmico de tipo pasivo con detectores de selenuro de plomo, para los ejes de cabeceo y rotación, con una precisión de ± 0.1 grados, con las mismas características del sensor de sol en cuanto a conversión y cobertura de visión.
- Se eligió un sistema de filtrado entre varios que satisficiera las necesidades de adquisición de datos y control, y con flexibilidad para acoplarse a los recursos disponibles de proceso. Por ser un método sencillo, confiable y adaptable se optó por aplicar el método de ajuste de datos a una curva de segundo grado con número de muestras variables.
- Para fines de proceso, fue elegido un microcontrolador Motorola del tipo 68HC11 por los recursos que ofrece en periféricos, programación y disponibilidad en el mercado.
- Como soporte para el proceso de filtrado, fue desarrollado un algoritmo de punto flotante para el microcontrolador 68HC11 de Motorola, con características de mantisa de 15 bits, un bit de signo de mantisa, siete bits de exponente y un bit de signo de exponente. La razón de no utilizar los algoritmos existentes para tal microcontrolador es que se requiere un sistema mínimo para aprovechar al máximo tiempo de proceso y capacidad de memoria.

RECOMENDACIONES

Para dar continuidad al presente trabajo se recomienda:

- Incluir más microcontroladores (uno por eje) para realizar procesamiento en paralelo y agilizar la adquisición de datos, con la condición de comunicación entre ellos para asegurar la sincronía en el envío de los datos a la computadora principal.
- Realizar las pruebas de los sensores dentro de un laboratorio con condiciones de iluminación externa nula, utilizando una lámpara incandescente alimentada con una fuente de voltaje regulada, para evitar en lo posible variaciones debidas al suministro eléctrico.
- Hacer un algoritmo para tomar la decisión de conmutar la adquisición de los datos de orientación de cabeceo, puesto que éste eje es redundante en el sistema propuesto en esta tesis. Para ello se debe considerar como criterio la mejor lectura de acuerdo con las condiciones de operación de los sensores (en etapa de eclipse sólo está disponible las lecturas de cabeceo y rotación, por lo que el sensor de tierra debe asumir la tarea de proporcionar el dato de cabeceo y no el sensor de sol).
- Instrumentar la plataforma con sensores de velocidad angular (giróscopos), para obtener todos los parámetros necesarios para determinar la orientación del satélite; ya que en este momento solo se cuenta con los vectores de posición.

APÉNDICE A

LISTADO DEL PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR PARA ADQUISICIÓN, FILTRADO Y TRANSMISIÓN DE DATOS.

El siguiente listado contiene el código en el editor ensamblador, del programa que realiza: la adquisición de datos a través tres de las cuatro entradas del convertidor analógico a digital del microcontrolador 68HC11A1; el filtrado digital de los valores de desviación adquiridos; y la transmisión a la pc de los resultados.

El inicio del programa se efectúa a partir de la dirección \$C800, y en el listado está expresado como " ***** PROCESO DE FILTRADO ***** ", que es por lo tanto el cuerpo del programa.

Las primeras subrutinas efectúan la base de las operaciones aritméticas, por medio de un proceso de punto flotante, desarrolladas especialmente para los fines de filtrado, permitiendo un código suficientemente corto para maximizar la rapidez del proceso total.

La parte central del listado efectúa las rutinas de cálculos de los coeficientes de la ecuación de segundo grado, que es el principio básico para el filtrado por el método de mínimos cuadrados.

Al final del listado se encuentra la subrutina de transmisión que configura el puerto serie del microcontrolador para el envío de los datos de resultado.

```
*****  
***** PROGRAMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS, FILTRADO POR EL MÉTODO DE *****  
***** AJUSTE A UNA CURVA DE SEGUNDO GRADO POR MÍNIMOS CUADRADOS Y *****  
***** TRANSMISIÓN DE LOS DATOS PARA EL MICROCONTROLADOR 68HC11A1 *****  
*****
```

```
EXP1:      EQU    $0000  
MNT11:     EQU    $0001  
MNT12:     EQU    $0002  
EXP2:      EQU    $0003  
MNT21:     EQU    $0004  
MNT22:     EQU    $0005  
EXPR:      EQU    $0006  
MNTR1:     EQU    $0007  
MNTR2:     EQU    $0008  
MNTR3:     EQU    $0009  
MNTR4:     EQU    $000A  
CCREP:     EQU    $000B
```

```

I:      EQU    $000C
Z:      EQU    $000D
J:      EQU    $000F
M:      EQU    $0010
I2:     EQU    $0011
XPF:    EQU    $D096
MPF:    EQU    $D09D
N:      EQU    $D0A0
O:      EQU    $D0A3
P:      EQU    $D0A6
Q:      EQU    $D0A9
R:      EQU    $D0AC
S:      EQU    $D0AF
T:      EQU    $D0B2
SUMN:   EQU    $D0C0
SUMO:   EQU    $D0C3
SUMP:   EQU    $D0C6
SUMQ:   EQU    $D0C9
SUMR:   EQU    $D0CC
SUMS:   EQU    $D0CF
SUMT:   EQU    $D0D2
DET:    EQU    $D0D5
DA:     EQU    $D0D8
DB:     EQU    $D0DB
DC:     EQU    $D0DE
YEST:   EQU    $D0E4
INDZ:   EQU    $D0E7
ALMMS1: EQU    $D102
ALMMS2: EQU    $D105
A11:    EQU    $D110
A12:    EQU    $D113
A13:    EQU    $D116
COEFA:  EQU    $D119
A21:    EQU    $D11C
A22:    EQU    $D11F
A23:    EQU    $D122
COEFB:  EQU    $D125
A31:    EQU    $D128
A32:    EQU    $D12B
A33:    EQU    $D12E
COEFC:  EQU    $D131

```

```

*****
***** SUBROUTINA PRINCIPAL DE SUMA Y RESTA *****
*****

```

```

SUMA:   ORG    $C000
        PSHX
        PSHY
        CLRA
        STAA  @I
        LDD  @MNT11
        BNE  SIG1SUM
        LDD  @MNT21
        BNE  SIG1SUM
        LDAA #81
        STAA @EXPR
        CLRA

```

```

CLR
STD @MNTR1
JMP RETPRINSUM
SIG1SUM: LDAA @EXP1
LDAB @EXP2
CBA
BEQ SUMMNTS
BGT INCEXP2
INCEXP1: LDX #0000
LDY #0003
AJTEXPS: JSR INCEXP
INC I
LDAA #0F
CMPA I
BNE SIG1SUM
LDD $00,Y
STD @EXPR
LDAA $02,Y
STAA @MNTR2
BRA RETPRINSUM
INCEXP2: LDX #0003
LDY #0000
BRA AJTEXPS
SUMMNTS: LDAA @EXP1
STAA @EXPR
LDD @MNT11
ADDD @MNT21
STD @MNTR1
BRSET @MNT11,$80,MNT1NEG
BRSET @MNT21,$80,MNTSPYN
MNTSPOS: BRCLR @MNTR1,$80,RETPRINSUM
LSR MNTR1
ROR MNTR2
INC EXPR
BRA RETPRINSUM
MNT1NEG: BRCLR @MNT21,$80,MNTSPYN
MNTSNEG: BRSET @MNTR1,$80,SALEMN
ROR MNTR1
ROR MNTR2
INC EXPR
BRA RETPRINSUM
SALEMN: BRCLR @MNTR1,$40,RETPRINSUM
LDX #0006
JSR INCEXP
BRA MNTSNEG
MNTSPYN: BRSET @MNTR1,$80,RESNEGSUM
RESPOSSUM: LDD @MNTR1
BEQ RETPRINSUM
BRSET @MNTR1,$40,RETPRINSUM
JSR DECEXP
BRA RESPOSSUM
RESNEGSUM: BRCLR @MNTR1,$40,RES8000?
JSR DECEXP
BRA RESNEGSUM
RES8000?: LDD #8000
CPD @MNTR1
BNE RETPRINSUM
BSET @MNTR2,$01
RETPRINSUM: PULY
PULX

```

RTS

*** SUBROUTINA DE RESTA

SUBST: CLRA
 SUBA @MNT22
 STAA @MNT22
 LDAA #\$00
 SBCA @MNT21
 STAA @MNT21
 JSR SUMA
 RTS

** Subrutina de corrimiento de mantisas con su incremento de exponente **
***** para SUMA y RESTA *****

INCEXP: BRCLR \$01,X,\$80,CORINCEXP
 BRCLR \$02,X,\$01,CORINCEXP
 ASR \$01,X
 ROR \$02,X
 INC \$00,X
 LDD #\$0001
 ADDD \$01,X
 STD \$01,X
 RTS
CORINCEXP: ASR \$01,X
 ROR \$02,X
 INC \$00,X
RETINCEXP: RTS

**** Subrutina de corrimiento de resultado con decremento de exponente ****
***** para SUMA y RESTA *****

DECEXP: ASL MNTR2
 ROL MNTR1
 DEC EXPR
 RTS

***** SUBROUTINA PRINCIPAL DE MULTIPLICACION *****

MULT: PSHX
 PSHY
 CLR CCRFP ; Limpia ccrfp
 LDD @MNT11
 BEQ RESCERO
 LDD @MNT21
 BEQ RESCERO
 BRA SIGMULT
RESCERO: LDD #\$8100
 STD @EXPR
 STAB @MNTR2

```

SIGMULT:   JMP      RETMULT
           JSR      SIGNMYD          ; Guarda signo de resultado      ***
           LDD      @EXP1
           STD      ALMMTS1
           LDD      @MNT12
           STD      ALMMTS1+$02
           LDD      @MNT21
           STD      ALMMTS2+$01
           CLRA
           CLRB
           STD      @EXPR            ; Limpia resultado...
           STD      @MNTR2          ;
           STAA     @MNTR4          ;
           BSET     @EXPR,$80       ; Predetermina exponente minimo
           LDD      @MNT11          ; Decide si mantisa 1 es cero...
           BEQ      RETORNAMZ       ; si es asi, sale de la rutina de mult
MNT1NZ:   LDD      @MNT21          ; Decide si mantisa 2 es cero...
           BEQ      RETORNAM       ; si es asi, sale de la rutina de mult
           JSR      AJSMYD          ; Ajusta la posición de la mantisa
SIGUEM:   LDAA     @EXP1            ; Continua proceso de mult...
           ADDA     @EXP2            ; sumando los exponentes...
           STAA     @EXPR            ; y almacenando en expr
           INC      EXPR            ;
           LDY      #$0008          ;
           CLRA
           STAA     @I              ; Limpia indice de conteo
           STAA     @EXP1            ; Limpia exp1
           STAA     @EXP2            ; Limpia exp2
AM:       BRCLR   @MNT22,$01,BM    ; Determina suma o corrimiento en residuo
           LDD      @MNT11          ; 1 en cociente, por lo tanto...
           ADDD     $01,Y            ; suma mantisa 2 con residuo...
           STD      $01,Y            ; y suma en residuo
           LDAA     @EXP1            ;
           ADCA     $00,Y            ;
           STAA     $00,Y            ;
BM:       BRSET   @I,$80,RETORNAM  ; Control de corrimiento segmentado
           LDX      #$0000          ;
           BSR      CORIZQ          ;
           LDX      #$0003          ;
           BSR      CORDER          ;
           INC      I              ;
           BRCLR   @I,$08,AM        ; Control de ciclos de corrimiento
           BCLR    @I,$0F          ;
           LDX      #$0000          ;
CM:       BSR      CORDER          ; 8 corrimientos a la derecha...
           INC      I              ; en mantisa 1...
           BRCLR   @I,$08,CM        ; para correr segmento a la izq
           DEY
           XGDY
           LDAA     #$06            ;
           CBA
           BNE     DM              ; Comprueba su Y indica ultimo segmento
           BSET    @I,$80          ; Indica cese de corrim de segmentos
DM:       CLRA
           XGDY
           BCLR    @I,$0F          ; Limpia cuenta en I...
           BRA     AM              ; y retorna al siguiente bucle de mult
RETORNAMZ: LDD      #$7FFF
           STD      @MNTR1
RETORNAM: JSR      AJSTR            ; Ajusta resultado      ***

```

```

CLR      CCRFP
LDD      ALMNTS1
STD      @EXP1
LDD      ALMNTS1+$02
STD      @MNT12
LDD      ALMNTS2+$01
STD      @MNT21
RETMULT: PULY
          PULX
          RTS
;***** RETORNO PRINCIPAL DE MULT *****

```

***** Subrutina de corrimiento a la derecha *****

```

CORDER:  LSR      $00,X
          ROR      $01,X
          ROR      $02,X
          RTS

```

***** Subrutina de corrimiento a la izquierda *****

```

CORIZQ:  LSL      $02,X
          ROL      $01,X
          ROL      $00,X
          RTS

```

***** SUBROUTINA PRINCIPAL DE DIVISION *****

```

DIV:      JSR      SIGNMYD
          LDD      @EXP1
          STD      ALMNTS1
          LDD      @MNT12
          STD      ALMNTS1+$02
          LDD      @MNT21
          STD      ALMNTS2+$01
          LDD      @MNT21
          BNE      CONTDIV
          LDD      #$8100
          STD      @EXPR
          STAB     @MNTR2
          BRA      RETDIV
CONTDIV:  JSR      AJSMYD
          LDD      @MNT21
          BNE      CALCDIV
          LDD      #$8100
          STD      @EXPR
          STAB     @MNTR2
          BRA      RETPRINCD
CALCDIV:  CLRA
          CLR      CLRB
          STD      @EXPR
          STD      @MNTR2
          LDD      @MNT21
          STD      @MNTR3
          ; Limpia...
          ;acumuladores de...
          ;exponente de resultado y mantisa R1...
          ;mantisa R2
          ; Transfiere...
          ;mantisa 2 a mantisa R3 y R4 para no
          ; Resto exponente 2...
          ;y exponente 1...
          LDAA     @EXP2
          SUBA     @EXP1

```

```

      STAA @EXPR ;y resultado en expr
      LDAA #$0F ; Determina valor de inicio en expr...
      ADDA @EXPR ;para compensar corrimientos...
      STAA @EXPR ;mas adelante en el resultado
AD:    LDD @MNTR3
      CPD @MNT11
      BLO BD
AD1:   BSET @MNTR2,$01 ; Si mnt2 >= mnt1, entonces bms de R es 1
      BSR M2-M1 ; Subrutina obtiene residuo
BD:    BRSET @MNTR1,$40,SALE ; Termina si en $40 de mntr1 aparece 1
      BSR CIMR ; Corrimiento a la izq del resultado
      BSR CIRSD ; Corrimiento a la izq del residuo
      BRA AD ; Regresa el bucle
SALE:  CLRA ; Limpia...
      CLR B ;mantisa...
      STD @MNTR3 ;R3 y R4
      JSR AJSTR ; Acondiciona el resultado en signo y exp
      CLR CCRFP
RETDIV: LDD ALMNTS1
      STD @EXP1
      LDD ALMNTS1+$02
      STD @MNT12
      LDD ALMNTS2+$01
      STD @MNT21
RETPRINC: RTS ;**** RETORNO PRINCIPAL DE DIV ****

```

***** Subrutina obtiene residuo *****

```

M2-M1: LDAA @MNTR4
      SUBA @MNT12
      STAA @MNTR4
      LDAA @MNTR3
      SBCA @MNT11
      STAA @MNTR3
      RTS

```

***** Subrutina realiza corrimiento de mantisa de resultado *****
***** a la izquierda y ajuste de exponente *****

```

CIMR:  DEC EXPR
      ASL MNTR2
      ROL MNTR1
      RTS

```

***** Subrutina realiza corrimiento de mantisa de residuo *****
***** a la izquierda *****

```

CIRSD: ASL MNTR4
      ROL MNTR3
      RTS

```

***** Subrutina que guarda signo del resultado en CCRFP *****

```

SIGNMYD: BRSET @MNT11,$80,M1NEG
MIPOS:   BRSET @MNT21,$80,RESNEG
      BRA RESPOS
M1NEG:   BRSET @MNT21,$80,RESPOS
RESNEG:  BSET @CCRFP,$80 ; Resultado negativo (1 en $80 de CCRFP)
      BRA SIGUE
RESPOS:  BCLR @CCRFP,$80 ; Resultado positivo (0 en $80 de CCRFP)
SIGUE:   RTS

```

***** Subrutina de ajuste de mantisas, conversion a positivo *****
 ***** para proceso de division *****

```

AJSMYD:   BRCLR @MNT11,$80,AJSTM1 ; Salta a corrimiento izq en mnt1
C2MNT1:   CLR    A          ; Conversion de neg a pos en mnt1...
          SUBA  @MNT12          ;
          STAA  @MNT12          ;
          LDAA  #$00           ;
          SBCA  @MNT11          ;
          STAA  @MNT11          ;
AJSTM1:   CLR    I          ; Inicia contador del bucle
SIG1:     BRSET @MNT11,$40,CONTIN ; Sale de ajuste de mnt1
          INC   I          ;
          ASL  MNT12          ; Corrimiento a la izq mnt1
          ROL  MNT11          ;
          DEC  EXP1          ; Decrementa exponente al corrim izq
          BRCLR @I,$10,SIG1    ; Retorno del bucle
          BSET @CCRFP,$40      ; No se encontro 1 al inicio de la mnt1...
PARO1:    BRA   PARO1         ; indica error en $40 de CCRFP y detiene
programa
CONTIN:   BRCLR @MNT21,$80,AJSTM2 ; Igual que las 16 lineas anteriores,
C2MNT2:   CLR    A          ; para mnt2...
          SUBA  @MNT22          ;
          STAA  @MNT22          ;
          LDAA  #$00           ;
          SBCA  @MNT21          ;
          STAA  @MNT21          ;
AJSTM2:   CLR    I          ;
          LDD  @MNT21          ;
          BEQ  RETORN         ;
SIG2:     BRSET @MNT21,$40,RETORN ;
          INC   I          ;
          ASL  MNT22          ;
          ROL  MNT21          ;
          DEC  EXP2          ;
          BRCLR @I,$10,SIG2    ;
          BSET @CCRFP,$10      ; No se encontro 1 al inicio de la mnt2...
          LDD  #$8100         ;
          STD  @EXP2          ;
          STAB @MNT22         ;
RETORN:   RTS
  
```

***** Subrutina de ajuste de resultado en corrimiento y signo *****

```

AJSTR:    CLR    I          ; Inicia contador de bucle
          LDD  @MNTR1         ;
          BNE  SIGAJR         ;
          LDD  #$8140         ;
          STD  @EXPR          ;
          CLR  MNTR2          ;
          BRA  RETAJR         ;
SIGAJR:   BRSET @MNTR1,$40,SALAJR ; Inicia/sale de buc si $40 en mntr1 es 1
          ASL  MNTR4          ; Corrim a la izq en mntr completa...
          ROL  MNTR3          ;
          ROL  MNTR2          ;
          ROL  MNTR1          ;
          DEC  EXPR          ; Decrementa expr por corrimiento
          INC  I          ;
          BRCLR @I,$20,SIGAJR ; Sale bucle o si no encuentra i mntr...
  
```

```

PARO3:      BSET   @CCRFP,$10      ;indicar error en CCRFP en $10...
SALAJR:    BRA     PARO3        ;y detiene programa
           BCLR   @CCRFP,$7F
           BRCLR  @CCRFP,$80,RETAJR ; Si resultado positivo salta a ajuste
           CLRA   ; Resultado negativo, aplica C2...
           CLRB   ;
           SUBD   @MNTR1        ;
           STD    @MNTR1        ;
RETAJR:    RTS

```

*** Subrutina de limpieza de sumatorias

```

LIMPSUM:   PSHY
           LDY    #SUMN
SIGLIMP:   LDD    #D0000
           STD    $00,Y
           STAA   $02,Y
           INY
           INY
           STY    @EXPR          ; Exponente de resultado se usa como
           LDD    @EXPR          ; auxiliar para transferir Y a D.
           LDAA   #$D2
           CBA    ; Compara ;ndice Y con D2...
           BPL    SIGLIMP        ;si Y<D0D2 incrementa ;ndice.
           PULY
           RTS

```

*** Subrutina adquiere dato y posiciona en tope de memoria de datos

```

ADMEM:     PSHX
           PSHY
           LDX    #$1000        ; ;ndice X se usar para registros.
           LDD    #D0000
           STD    @EXP1         ; Limpia acumuladores de pf.
           STD    @MNT12        ;
           STD    @MNT21        ;
           LDAA   @M
           LDAB   #$03
           MUL    ; M*3
           STD    @MNTR1
           LDD    #D0000
           ADDD   @MNTR1        ;
           STD    INDZ          ; Dirección calculada para dato nuevo
           ; Y=M*3+D000-3
           LDY    #D0000
DATOSIG:   INY
           INY
           INY
           LDD    $03,Y        ; Transfiere dato a dirección inferior
           STD    $00,Y
           LDAA   $05,Y
           STAA   $02,Y
           STY    @MNTR3        ; Mantisas 3 y 4 de resultado auxiliar
           LDD    INDZ
           CPD    @MNTR3
           BHS    DATOSIG        ; Decide si se recorrió el tmo dato
           LDAA   #$80
           STAA   $39,X        ; Configura puerto A/D
           LDAA   #$10

```

```

      STAA    $30,X
FINAD: BRSET  $30,X,$80,BYTENT ; "Est listo para adquirir dato?
      BRA    FINAD
BYTENT: LDAA  $31,X           ; Adquiere dato
      BNE    DATNZ
      INCA
DATNZ: STAA  @MNT11
      STAA  $D200
      JSR  CNVDT8PF
      LDD  @EXPR
      STD  $00,Y
      LDAA @MNTR2
      STAA $02,Y
      PULY
      PULX
      RTS

```

*** Subrutina transfiere dato con direcci3n expresada en indice Z
 *** al acumulador 1

```

DTAM1: PSHX
      LDX  @Z
      LDD  $00,X
      STD  @EXP1
      LDAA $02,X
      STAA @MNT12
      PULX
      RTS

```

*** Subrutina transfiere dato con direcci3n expresada en indice Z
 *** al acumulador 2

```

DTAM2: PSHX
      LDX  @Z
      LDD  $00,X
      STD  @EXP2
      LDAA $02,X
      STAA @MNT22
      PULX
      RTS

```

*** Subrutina transfiere resultado de operaci3n a direcci3n expresada
 *** en indice Z

```

RESADIR: PSHX
      LDX  @Z
      LDD  @EXPR
      STD  $00,X
      LDAA @MNTR2
      STAA $02,X
      PULX
      RTS

```

*** Subrutina transfiere resultado a mantisa 1

```

RESAM1: LDD  @EXPR
      STD  @EXP1
      LDAA @MNTR2
      STAA @MNT12
      RTS

```

```

LSR    MNTR1
ROR    MNTR2
JSR    AJSTR
RTS

```

*** Subrutina de calculo de variables (filtro)

```

CLCVFLT:  LDAA    @J
          DECA
          LDAB    #$03
          MUL     ; J*3
          STD     @MNTR1
          LDD     PILA
          ADDD   @MNTR1 ; J*3+PILA
          STD     @MNTR1
          LDX     @MNTR1 ; Indice X=J*3+PILA
          LDAA   @J
          STAA   @MNTR1
          LDD     @EXPR
          STD     XPF
          STD     N ; N=XPF
          LDAA   @MNTR2
          STAA   XPF+$02
          STAA   N+$02
          LDD     #0 ;
          STD     @Z
          JSR    RESAM1 ;
          JSR    RESAM2 ;
          JSR    MULT ;
          JSR    RESADIR ; O=Xe2
          JSR    DTAM2
          JSR    MULT ;
          LDD     #P ;
          STD     @Z ;
          JSR    RESADIR ; P=Xe3
          JSR    DTAM2
          JSR    MULT
          LDD     #Q
          STD     @Z
          JSR    RESADIR ; Q=Xe4
          JSR    DTAM1
          LDD     @EXP1
          STD     R
          LDAA   @MNT12
          STAA   R+$02 ; R=Yi
          LDD     #N
          STD     @Z
          JSR    DTAM2
          JSR    MULT
          LDD     #S
          STD     @Z
          JSR    RESADIR ; S=Yi*X
          LDD     #0
          STD     @Z
          JSR    DTAM2
          JSR    MULT
          LDD     #T

```

```

JSR    DTAM2
JSR    MULT
LDD    #T
STD    @Z
JSR    RESADIR        ; T=Yi *Xe2
LDD    #N
STD    @Z
JSR    DTAM1
LDD    #SUMN
STD    @Z
JSR    DTAM2
JSR    SUMA
JSR    RESADIR        ; N=N+SUMN
LDD    #O
STD    @Z
JSR    DTAM1
LDD    #SUMO
STD    @Z
JSR    DTAM2
JSR    SUMA
JSR    RESADIR        ; O=O+SUMO
LDD    #P
STD    @Z
JSR    DTAM1
LDD    #SUMP
STD    @Z
JSR    DTAM2
JSR    SUMA
JSR    RESADIR        ; P=P+SUMP
LDD    #Q
STD    @Z
JSR    DTAM1
LDD    #SUMQ
STD    @Z
JSR    DTAM2
JSR    SUMA
JSR    RESADIR        ; Q=Q+SUMQ
LDD    #R
STD    @Z
JSR    DTAM1
LDD    #SUMR
STD    @Z
JSR    DTAM2
JSR    SUMA
JSR    RESADIR        ; R=R+SUMR
LDD    #S
STD    @Z
JSR    DTAM1
LDD    #SUMS
STD    @Z
JSR    DTAM2
JSR    SUMA
JSR    RESADIR        ; S=S+SUMS
LDD    #T
STD    @Z
JSR    DTAM1
LDD    #SUMT
STD    @Z
JSR    DTAM2
JSR    SUMA

```

```

        JSR     RESADIR           ; T=T+SUMT
        RTS

CLCCOEEC:  JSR     CAMATZ
           JSR     GAUSJ
           RTS

CAMATZ:    LDD     MPF
           STD     A11
           LDAA   MPF+$02
           STAA   A11+$02
           LDD     SUMN
           STD     A12
           STD     A21
           LDAA   SUMN+$02
           STAA   A12+$02
           STAA   A21+02
           LDD     SUMO
           STD     A13
           STD     A22
           STD     A31
           LDAA   SUMO+$02
           STAA   A13+$02
           STAA   A22+02
           STAA   A31+$02
           LDD     SUMP
           STD     A23
           STD     A32
           RTS

GAUSJ:     LDD     #MPF           ; H1
           STD     @Z
           JSR     DTAM1
           LDD     #A12
           STD     @Z
           JSR     DTAM2
           JSR     DIV
           JSR     RESADIR
           LDD     #A13
           STD     @Z
           JSR     DTAM2
           JSR     DIV
           JSR     RESADIR
           LDD     #COEFA
           STD     @Z
           JSR     DTAM2
           JSR     DIV
           JSR     RESADIR

H21:       LDD     #A12
           STD     @Z
           JSR     DTAM1
           LDD     #A21
           STD     @Z
           JSR     DTAM2
           JSR     MULT
           JSR     RESAM2
           LDD     #A22

```

STD @Z
JSR DTAM1
JSR SUBST
JSR RESADIR

LDD #A13
STD @Z
JSR DTAM1
LDD #A21
STD @Z
JSR DTAM2
JSR MULT
JSR RESAM2
LDD #A23
STD @Z
JSR DTAM1
JSR SUBST
JSR RESADIR

LDD #COEFA
STD @Z
JSR DTAM1
LDD #A21
STD @Z
JSR DTAM2
JSR MULT
JSR RESAM2
LDD #COEFB
STD @Z
JSR DTAM1
JSR SUBST
JSR RESADIR

H31:

LDD #A12
STD @Z
JSR DTAM1
LDD #A31
STD @Z
JSR DTAM2
JSR MULT
JSR RESAM2
LDD #A32
STD @Z
JSR DTAM1
JSR SUBST
JSR RESADIR

LDD #A13
STD @Z
JSR DTAM1
LDD #A31
STD @Z
JSR DTAM2
JSR MULT
JSR RESAM2
LDD #A33
STD @Z
JSR DTAM1

	JSR	SUBST
	JSR	RESADIR
H2:	LDD	#A22
	STD	@Z
	JSR	DTAM1
	LDD	#A23
	STD	@Z
	JSR	DTAM2
	JSR	DIV
	JSR	RESADIR
	LDD	#COEFB
	STD	@Z
	JSR	DTAM2
	JSR	DIV
	JSR	RESADIR
H32:	LDD	#A23
	STD	@Z
	JSR	DTAM1
	LDD	#A32
	STD	@Z
	JSR	DTAM2
	JSR	MULT
	JSR	RESAM2
	LDD	#A33
	STD	@Z
	JSR	DTAM1
	JSR	SUBST
	JSR	RESADIR
H3:	LDD	#A33
	STD	@Z
	JSR	DTAM1
	LDD	#COEFC
	STD	@Z
	JSR	DTAM2
	JSR	DIV
	JSR	RESADIR
H23:	LDD	#A23
	STD	@Z
	JSR	DTAM1
	LDD	#COEFC
	STD	@Z
	JSR	DTAM2
	JSR	MULT
	JSR	RESAM2
	LDD	#COEFB
	STD	@Z
	JSR	DTAM1
	JSR	SUBST
	JSR	RESADIR
H13:	LDD	#A13
	STD	@Z
	JSR	DTAM1

```
LDD    #COEFC
STD    @Z
JSR    DTAM2
JSR    MULT
JSR    RESAM2
LDD    #COEFA
STD    @Z
JSR    DTAM1
JSR    SUBST
JSR    RESADIR
```

```
H12:   LDD    #A12
        STD    @Z
        JSR    DTAM1
        RTS
```

```
CALCYEST: LDD    #COEFC
          STD    @Z
          JSR    DTAM1
          LDD    #0
          STD    @Z
          JSR    DTAM2
          JSR    MULT
          LDD    #YEST
          STD    @Z
          JSR    RESADIR
          LDD    #COEFB
          STD    @Z
          JSR    DTAM1
          LDD    #N
          STD    @Z
          JSR    DTAM2
          JSR    MULT
          JSR    RESAM2
          LDD    #YEST
          STD    @Z
          JSR    DTAM1
          JSR    SUMA
          JSR    RESAM2
          LDD    #COEFA
          STD    @Z
          JSR    DTAM1
          JSR    SUMA
          LDD    #YEST
          STD    @Z
          JSR    RESADIR
          RTS
```

```
*****
***** PROCESO DE FILTRADO *****
*****
```

```
ORG    $C800      ;
LDAA   #$80
STAA   $1030
STAA   $1039
LDD    #$CFFD
```

	STD	PILAA
	LDD	#\$D08D
	STD	PILAB
	LDD	#\$D11D
	STD	PILAC
INICIAA:	CLRA	
	STAA	I2
	STAA	\$D404
	JSR	SERIAL
FILTRO:	CLR	MNTR1
	LDAA	I2
	STAA	MNTR2
	LDD	#PILAA
	ADDD	MNTR1
	STD	MNTR1
	LDX	MNTR1
	LDD	\$00,X
	STD	PILA
	JSR	ADMEM
	STD	MNTR1
	CLR	MNTR2
	CLR	MNTR3
	CLR	CCRFP
	LDAA	#\$08
	STAA	@EXFR
	LSR	MNTR1
	ROR	MNTR2
	JSR	AJSTR
	LDD	#MPF
	STD	@Z
	JSR	RESADIR
	JSR	LIMP SUM
	CLRA	
	INCA	
	STAA	@J
	ldy	PILA
	INY	
	INY	
	INY	
PROCES:	JSR	CLCVFLT
	iny	
	iny	
	iny	
	INC	J
	LDAA	@M
	INCA	
	LDAB	@J
	CBA	
	BHI	PROCES
	JSR	CLCCOEEC
	JSR	CALCYEST
	LDD	YEST
	STD	\$D403
AJSTSAL:	LDAA	\$D403
	LDAB	#\$08
	CBA	
	BEQ	SALFILT
CORDERDAT:	LSR	\$D404

```

ROR      $D405
INC      $D403
BRA      AJSTSAL
SALFILT: ASL      $D405
ROL      $D404
CLR      $D406
JSR      SERIAL
INC      I2
INC      I2
LDAA     I2
LDAB     #$06
CBA
BEQ      PIEDTA
JMP      FILTRO
PIEDTA:  JMP      INICIAA

```

***** TRANSMISION DE DATOS*****

```

SERIAL:  ORG      $CA00          ;INICIA EL PROGRAMA EN LA DIRECCON $b600
          LDAA     #$30          ;INICIA BAUDAJE, 1 BIT STOP,
          STAA     $102B        ;SIN PARIDAD Y 8 BITS DE DAT
          LDAA     #$2C          ;HABILITA TRANSMISION
          STAA     $102D
CONFIGURA: LDX     #$1000        ;CARGA UN $1000 EN X
FIN:      BRSET   $30,X,$80,BYTE ;VERIFICA EL BIT CCF
          BRA      FIN          ;PARA SABER CUANDO TERMINA
BYTE:     LDAA     $D404
TRANSM:   LDAB     $102E        ;VERIFICA SI ESTA LISTO ....
          ANDB     #$40          ;PARA TRANSMITIR (TC = 1)
          BEQ      TRANSM       ;SI NO ESTA LISTO REGRESA
          STAA     $102F        ;TRANSMITO EL DATO
          RTS

```

***** FIN DEL PROGRAMA DE FILTRADO *****

```
*****
***** PROGRAMA EN C PARA PROBAR EL MÉTODO DE MINIMOS CUADRADOS *****
*****
```

```
#include <stdio.h>
#include <graphics.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#define PI 3.141592654
float Xmax, Ymax, NC, mags, magr, j;
float i, theta, M, X[50], Y[50], N[50], O[50], P[50], Q[50],
      R[50], S[50], T[50], n, o, p, q, r, s, t, Yestant, Yest;
void calcula_senoruid(void);
void minimcua(void);
void dibuja_senoruido(void);
void dibuja_senoest(void);
void margen(void);

main()
{ int gdriver=DETECT, gmode;
  printf("Valores recomendados:\n");
  printf("\nNC (numero de ciclos de señal seno): 5");
  printf("\nM (numero de muestras para minimos cuadrados): 50");
  printf("\nmags (amplitud señal seno): 100");
  printf("\nmagr (amplitud señal ruido): 10");
  printf("\n\nEntrar NC: ");
  scanf("%f", &NC);
  printf("Entrar muestras M: ");
  scanf("%f", &M);
  printf("Entrar mags: ");
  scanf("%f", &mags);
  printf("Entrar magr: ");
  scanf("%f", &magr);
  initgraph(&gdriver, &gmode, "\\tc");
  Xmax = getmaxx();
  Ymax = getmaxy();
  margen();
  calcula_senoruid();
  getch();
  closegraph();
}

void calcula_senoruid(void)
{ for (i=0; i<=Xmax; i++)
  { for (j=0; j<=M-1; j++)
    { X[j] = j; Y[j] = Y[j+1];
      theta=2*PI*(j+i)*NC/640;
    }
    Y[M-1] = -mags*sin(theta) + magr * (rand()/16383.5 - 1);
    dibuja_senoruido();
    minimcua();
  }
}
```

```
*****
***** PROGRAMA DE GRAFICACIÓN DE TRES SEÑALES CORRESPONDIENTES *****
***** A LOS DATOS DE DESVIACIÓN PROVENIENTES DEL MICROCONTROLADOR *****
*****
```

```
#include <time.h>
#include <stdio.h>
#include <dos.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <conio.h>
#include <graphics.h>
int controlador, modo;

unsigned dirAsync[]={0x3F8,0x2F8};
unsigned asyncNo;
char puerto[2];

void pintapantalla(void);
void presentacion(void);

char *aviso,*tiempnt,caracter;
int
x=0,equis,grad,ban=0,puntanta,puntantb,puntantc,tiempban,tiempobanant,ytie
mpo=450;
float a,b,c;

void main(int argc, char *argv[])
{
    time t tiempo1,tiempo2;
    controlador=DETECT;
    initgraph(&controlador,&modo,"");
    clearviewport();
    rectangle(0,0,639,479);
    puerto[1] = 0;
    if (argc < 2)
    {
        do{
            gotoxy(20,10);
            printf("Deseas usar el puerto del mouse?  <S/N>");
            caracter = getch ();
            if ((caracter == 's') || (caracter == 'S'))
                puerto[0] = '1';
            else
                puerto[0] = '2';
            asyncNo = atoi(puerto);
            if(!(asyncNo == 1 || asyncNo == 2)){
                gotoxy(10,24);
            }
        } while (1);

        clearviewport();
        setcolor(1);
        rectangle(0,0,639,479);
        rectangle(2,2,637,477);

        --asyncNo;
        bioscom(0,227,asyncNo);
        setttextstyle(2,0,0);
    }
}
```

```

void margen(void)
{ line(0,0,Xmax,0);
  line(0,0,0,Ymax/2-5);
  line(0,Ymax/2-5,Xmax,Ymax/2-5);
  line(Xmax,0,Xmax,Ymax/2-5);
  line(0,Ymax/2+5,0,Ymax);
  line(0,Ymax/2+5,Xmax,Ymax/2+5);
  line(0,Ymax,Xmax,Ymax);
  line(Xmax,Ymax/2+5,Xmax,Ymax);
}

void minimcua(void)
{ float Ye[50], D, Da, Db, Dc, a, b, c;
  for (j=0;j<=M-1;j++) {Ye[j] = Y[j];}
  for (j=0; j<=M-1; j++)
  { N[j]=X[j]; O[j]=N[j]*X[j];
    P[j]=O[j]*X[j]; Q[j]=P[j]*X[j];
    R[j]=Ye[j]; S[j]=Ye[j]*X[j];
    T[j]=Ye[j]*O[j];
  }
  n=0; o=0, p=0; q=0; r=0; s=0; t=0;
  for (j=0; j<=M-1; j++)
  { n=n+N[j]; o=o+O[j];
    p=p+P[j]; q=q+Q[j];
    r=r+R[j]; s=s+S[j];
    t=t+T[j];
  }
  D=M*o*q+2*n*p*o-o*o*o-p*p*M-n*n*q;
  Da=r*o*q+s*p*o+t*n*p-o*o*t-p*p*r-q*n*s;
  Db=M*s*q+n*t*o+o*r*p-o*o*s-p*t*M-q*r*n;
  Dc=M*o*t+n*p*r+o*n*s-o*o*r-s*p*M-t*n*n;
  a = Da/D; b = Db/D; c = Dc/D;
  for (j=0;j<=M-1;j++)
  { Ye[j] = a + b * X[j] + c * X[j] * X[j];
  }

  Yestant = Yest;
  Yest = a + b * X[M-1] + c * X[M-1] * X[M-1];
  dibuja_senoest();
}

```

```

void dibuja_senoruido(void)
{ float X1, X2, Y1, Y2;
  X1 = X[M-2] + i; Y1 = Y[M-2] + Ymax / 4;
  X2 = X[M-1] + i; Y2 = Y[M-1] + Ymax / 4;
  line(X1, Y1, X2, Y2);
}

```

```

void dibuja_senoest(void)
{ float X1, X2, Y1, Y2;
  X1 = X[M-2] + i; Y1 = Yestant + 3 * Ymax / 4;
  X2 = X[M-1] + i; Y2 = Yest + 3 * Ymax / 4;
  line(X1,Y1,X2,Y2);
}

```

***** FIN DEL PROGRAMA *****

```

outtextxy(78,465,"Usando COM-1-");
setbkcolor(WHITE);
pintapantalla();
tiempol=time(NULL);
while(1)
{
    while (!kbhit()){
        if (x <= 149)
        {
            equis=x*3+81;
            if (ban == 0)
            {
                setcolor(BLACK);
                line(equis,48,equis,430);
                tiempo2=time(NULL);
                tiempban=tiempo2-
tiempol;/*difftime(tiempol,tiempo2);*/

                if (tiempban-
tiempobanant!=0)
                {
                    itoa(tiempo2-
tiempol,tiempnt,10);
                    setcolor(BLACK);
                    outtextxy(equis,450,"00");
                    setcolor(BLUE);
                    if
                    (ytiempo==450) ytiempo=440;
                    else ytiempo=450;
                    outtextxy(equis,ytiempo,tiempnt);
                    line(equis,431,equis,438);
                    line(equis,47,equis,40);
                    }
                    tiempobanant=tiempban;
                    setcolor(GREEN);
                    arre[equis] = recibido;
                    puntanta = recibido;
                    a = (puntanta / 2.56)*.24-12;
                    highvideo();
                    gotoxy(70,5);
                    printf("Valor1 =");
                    gotoxy(70,6);
                    printf("%.1f",a);
                    ban = 1;
                }
            else {
                if (ban == 1)
                {
                    setcolor(BLUE);
                    line(equis-3,303-
puntantb/2,equis,303-recibido/2);
                    puntantb=recibido;
                }
            }
        }
    }
}

```

2.56)*.24-12;

```
b = (puntantb /  
gotoxy(70,13);  
printf("Valor2 =");  
gotoxy(70,14);  
printf(" %.1f",b);  
ban = 2;
```

```
else
```

```
{  
setcolor(RED);  
arre3[equis] = recibido;  
pulantc=recibido;  
c = (pulantc / 2.56)*.24-12;  
gotoxy(70,21);  
printf("Valor3 =");  
gotoxy(70,22);  
printf(" %.1f",c);  
ban = 0;  
++x;
```

```
caracter = getch();  
if (( caracter == 's' ) || (caracter == 'S')){  
closegraph();  
exit(0);
```

```
}  
  
void pintapantalla(void){  
outtextxy(74,10,"GRAFICA DE DESVIACION EN GRADOS CONTRA TIEMPO, EN  
FRES EJES");  
settextstyle(2,1,0);  
outtextxy(10,200,"Grados de desvio");  
aviso="Salir con <S>";  
settextstyle(2,0,0);  
outtextxy(450,465,aviso);  
outtextxy(550,440,"tiempo {seg}");  
setcolor(BLUE);  
.or (equis=0;equis<=2;equis++)  
{  
if (equis==0) grad=175-64;  
else{ if (equis==1) grad=303-64;  
else grad=431-64;  
}  
setcolor(BLACK);  
outtextxy(50,grad-64-4,"-12");  
line(71,grad-64,78,grad-64);  
line(531,grad-64,538,grad-64);
```

```
setcolor(BLUE);
line(76,grad+64,531,grad+64);
line(71,grad,78,grad);
line(531,grad,538,grad);
outtextxy(50,grad-4,"0");
line(71,grad-21,78,grad-21);
line(531,grad-21,538,grad-21);
outtextxy(50,grad-21-4,"4");
line(71,grad-42,78,grad-42);
line(531,grad-42,538,grad-42);
outtextxy(50,grad-42-4,"8");
line(71,grad-63,78,grad-63);
line(531,grad-63,538,grad-63);
outtextxy(50,grad-63-4,"12");
line(71,grad+21,78,grad+21);
line(531,grad+21,538,grad+21);
outtextxy(50,grad+21-4,"-4");
line(71,grad+42,78,grad+42);
line(531,grad+42,538,grad+42);
outtextxy(50,grad+42-4,"-8");
line(71,grad+64,78,grad+64);
line(531,grad+64,538,grad+64);
outtextxy(50,grad+64-4,"-12");
}
rectangle(76,45,533,433);
rectangle(78,47,531,431);
```

```
}
-
```

APÉNDICE B

MODOS DE DIRECCIONAMIENTO DEL MICROCONTROLADOR HC11XX.

Modos de direccionamiento en mapa de memoria

Algunas de las instrucciones que trabajan dentro del 68HC11A1 necesitan que se determine una dirección en el mapa de memoria, ya sea para almacenar un dato en la misma, o en un registro, leer un dato o realizar una operación lógica, aritmética o de corrimiento. Por ello, y para facilitar la programación, hay diferentes formas de referenciar una localidad de memoria o registro.

Modo inmediato

Es una forma de referenciar una instrucción para que un dato sea guardado o modificado en algún acumulador, según su tamaño en bytes.

Es frecuentemente utilizado en el programa de filtrado y el algoritmo de punto flotante para guardar valores directamente en los acumuladores A, B, D o de índice X, Y. En el ensamblador es utilizado un caracter # para señalar que el operando es un dato que pretende guardarse en el acumulador.

Código de Máquina	operador	operand o	Comentarios
86 10	LDAA	#\$10	Carga 10h en el acumulador A.
CC 00 17	LDD	#\$0017	Carga 0017h en el doble acumulador D.
CE 10 00	LDX	#\$1000	Carga 1000h en el acumulador de índice X.

El signo \$ determina que el dato mostrado está expresado en hexadecimal. La nomenclatura puede variar entre los editores de ensamblador, pero la más aceptada es la que se muestra en la tabla 3.2.

Prefijo	Definición
Ninguno	Decimal
\$	Hexadecimal
@	Octal
%	Binario
	Carácter ASCII

Tabla 3.2. Prefijos utilizados para designar el sistema de numeración empleado.

Modo extendido

Se aplica para instrucciones que requieren acceder a una dirección de memoria o registro, expresando la dirección en dos bytes después del código de la instrucción, es decir, se expresa la dirección efectiva. El inconveniente de este método es la cantidad de bytes utilizados para su funcionamiento. En programas grandes no es usado frecuentemente por la exigencia de memoria que requiere.

Este modo de direccionamiento es utilizado en el programa de filtrado principalmente para salto a subrutinas.

Código de Máquina	Operador	Operando	Comentarios
BD 00	B6 JSR	\$B600	Salta a la subrutina localizada en la dirección B600h.

Modo directo

Se expresa después del código de la instrucción, la parte baja de la dirección referida, es decir, los ocho bits menos significativos de la dirección, y se asume que se trabaja dentro del rango de 0000h hasta 00FFh, que es denominada página directa o página cero.

La memoria RAM interna del microcontrolador es la más confiable y de mayor uso en el programa de filtrado, por lo que se hace referencia a ésta continuamente, situándola en la página cero. El direccionamiento directo ahorra espacio en la memoria ocupada por el programa, lo que explica su uso frecuente.

Código de Máquina	Operador	Operando	Comentarios
D6 00	LDAA	\$00	Carga en el acumulador A el contenido de la dirección 0000h.

Modo indexado

Se adiciona al argumento de la instrucción un corrimiento igual al valor almacenado en el índice X o Y. Es posible direccionar en un rango de X hasta X+FFh o de Y hasta Y+FFh por lo que la dirección efectiva determina con sólo un byte en un rango de 256 localidades de memoria.

Para el programa de filtrado, el modo indexado de direccionamiento es utilizado para referenciar las direcciones de los registros ubicados desde la dirección 1000h hasta la dirección 103Fh.

Código de Máquina	Operador	Operando	Comentarios
A7 39	STAA	\$39	Almacena el acumulador A en el registro 1039h cuando el acumulador X contiene el valor 1000h.

Modo inherente

La ejecución de la instrucción es conocida por el CPU puesto que se realiza en sus registros internos y en los acumuladores. No es necesario especificar localidad de memoria y usualmente la instrucción ocupa uno o dos bytes.

En el programa se utiliza el direccionamiento inherente al hacer incrementos o decrementos en los acumuladores y manipulación de bits en ellos.

Código de Máquina	Operador	Operando	Comentarios
1B	ABA		Adiciona el contenido del acumulador A al de B y el resultado lo carga en el acumulador A.
5C	INCB		Incrementa en 1 el contenido del acumulador B.

Modo relativo

Es utilizado para saltos cortos en el programa. A la dirección de ejecución actual es agregado un salto de n bytes expresado en el operando. Éste consta de un byte signado,

por lo que el salto puede referirse hasta 128 bytes adelante o -127 bytes atrás, a partir de la dirección siguiente a la última instrucción ejecutada.

En el programa de filtrado se ocupa en el salto a subrutinas pequeñas a corta distancia de la dirección donde es invocada. También se utiliza para saltos pequeños después de una instrucción de condición.

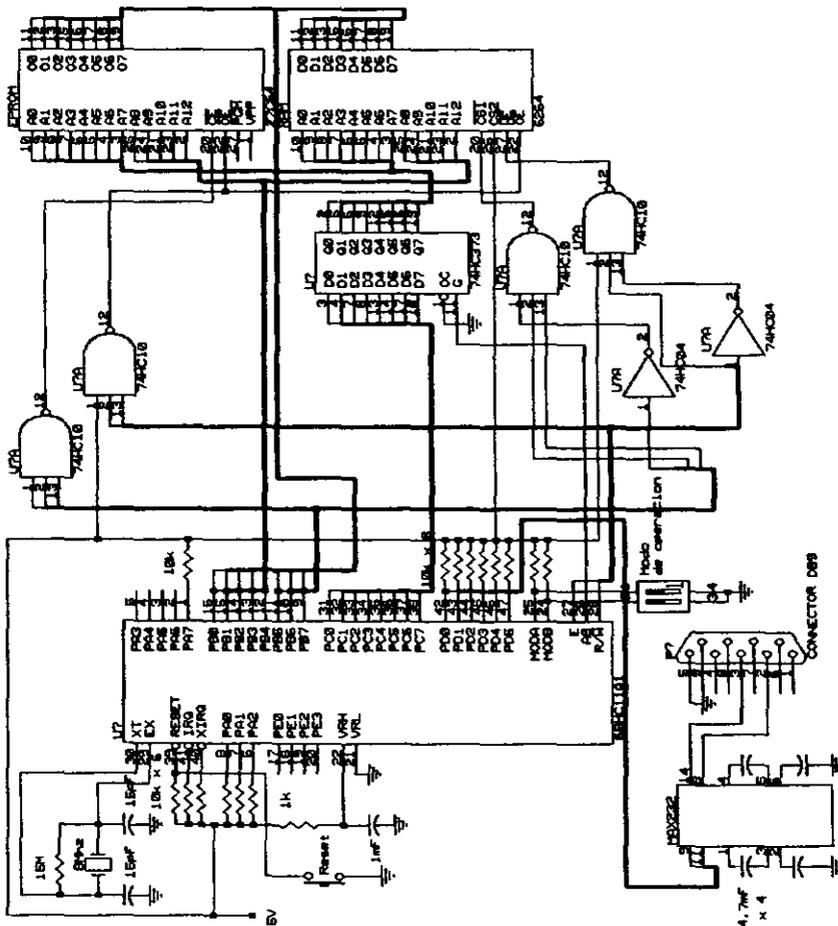
Código de Máquina	Operador	Operando	Comentarios
20 05	BRA	\$05	Salta a una dirección 5 bytes adelante de la siguiente en ejecución.
8D F0	BSR	\$F0	Salta a la subrutina ubicada 16 bytes antes de la dirección siguiente en ejecución.

α.

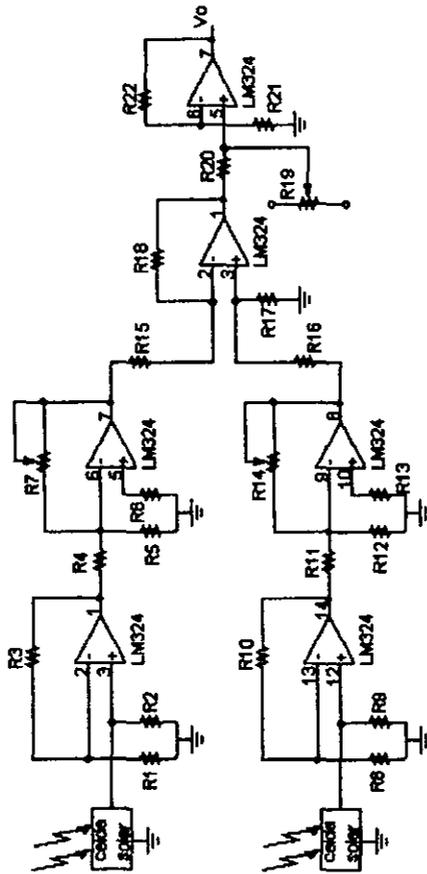
APÉNDICE C

DIAGRAMA ESQUEMATICO PARA EL MICROCONTROLADOR 68HC11 EN MODO EXPANDIDO

El siguiente diagrama corresponde al sistema utilizado en la presente tesis, para la adquisición de datos mediante un microcontrolador 68hc11 de Motorola. En él se puede observar los recursos periféricos adicionales para su operación en modo expandido. La comunicación con la pc se realiza en forma serial asincrónica, con una interface del tipo RS232 y un conector DB9. Las líneas de entrada son PE0, PE1 y PE2 (patas 17, 18 y 19 respectivamente en el chip).



CIRCUITO DE INTERFASE AL MICROCONTROLADOR PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES PROVENIENTES DE LOS SENSORES



El circuito corresponde a cada par de detectores, por lo que opera para cada eje

Referencias

- [1] J. A. DE LORENZO P. "Principios Fundamentales de la Física de C:O:V.". Ed. EDUNSA.
- [2] JAMES RUTHERFORD "Project Physics". F.
- [3] ROBERT L. WEBER "Física para Ciencia e Ingeniería".. Mc Graw Hill.
- [4] DAVID HALLIDAY, ROBERT RESNICK. "Física" parte II. Compañía Editorial Continental S. A. (C.E.C.S.A)
- [5] MOTOROLA. "HC11 Reference Manual". Edited by Motorola.
- [6] KARL J. AMSTROM. "Computer Controlled Systems, Theory and Design".
- [7] JOHN B. PEATMAN. "Design with Microcontrollers". Ed. Mc Graw Hill
- [8] GENE H. MILLER. "Microcomputer Engineering". Ed. Prentice Hall.
- [9] GOLD B., C. M. RADER "Digital Processing of Signals". Ed. Mc Graw Hill.
- [10] ANTHONY FONTANA. "A Photovoltaic Solar Sensor for use in Spacecraft Orientation Control Systems" NASA Technical Note (NASA TN D-3279). Langley Research Center. NASA.
- [11] JAMES R. WERTZ. "Spacecraft Attitude Determination and Control". Edited by Microcosm Inc.
- [12] TOM LOGSDON. Apuntes del curso "Mecánica Orbital, Teoría y Aplicaciones". Junio 1992. ESIME Ticoman.
- [13] PRADO J., PERALTA R. "Diseño y construcción de sensores para determinar la orientación de un satélite". SOMI XII Congreso Nacional de Instrumentación. Cancún, Quintana Roo, Septiembre de 1994. Memorias del Congreso. pp 452-456.
- [14] PRADO J., MIRANDA V., CORONA A. "Sensor de tierra para detección de orientación de un satélite". SOMI XII Congreso Nacional de Instrumentación. San Luis Potosí, SLP. Septiembre 30 – Octubre 3, 1997. Memorias del Congreso. pp 743-747.
- [15] PRADO J., PERALTA R., NAVARRETE M., BISIACCHI G. "Simulador físico para prueba de sistemas de detección de orientación de satélites en un medio sin fricción". SOMI XII Congreso Nacional de Instrumentación. San Luis Potosí, SLP. Septiembre 30 – Octubre 3, 1997. Memorias del Congreso. pp 738-742.