

123
2ij



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**TELEADQUISIDOR DE DATOS PARA
APLICACIONES ESPACIALES**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA DE ELECTRONICA)
P R E S E N T A :
VICTOR MANUEL MELO SERRANO



ASESOR: ESAU VICENTE VIVAS

MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que ayudaron a mi formación profesional, agradeciéndoles de una manera especial a las siguientes personas:

A mis padres Alicia Serrano Martínez y Oscar Melo Zamora por todo el apoyo moral y económico brindado para lograr mis metas y objetivos .

A mi abuela María de la Paz y a mis hermanos Oscar Federico y Raúl Alejandro.

A mi director de tesis Easú Vicente Vives por su apoyo, conocimientos y experiencia otorgados, así como su paciencia para conmigo.

A mis compañeros Martín López, Galdino Gutiérrez, Martín Juárez y a todos los becarios de la coordinación de automatización.

A mis amigos Alma Giraud y Gonzalo Rodríguez.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme brindado la oportunidad de estudiar una carrera profesional.

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1	Antecedentes.	1
1.2	Constitución de un microsatélite.	2
1.3	Módulos que integran a SATEX 1 e instituciones responsables.	4
1.4	Características globales del SATEX 1.	5
1.5	Principales actividades a realizar por el teleadquisidor del SATEX 1.	6

CAPITULO 2 ARQUITECTURA DEL TELEADQUISIDOR DE DATOS

2.1	Introducción.	7
2.2	Módulos del teleadquisidor de datos.	8
2.3	Control del suministro de energía para submódulos electrónicos del teleadquisidor y para la electrónica de control de los actuadores de SATEX 1.	9
2.4	Otros componentes del teleadquisidor.	11

CAPITULO 3 MICROCOMPUTADORAS UTILIZADAS Y PERIFÉRICOS

3.1	Introducción.	17
3.2	Computadoras integradas al teleadquisidor.	18
3.3	Periféricos del microcontrolador.	18

CAPITULO 4 ELECTRÓNICA DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

4.1	Introducción.	22
4.2	Acondicionamiento para sensores de corriente.	23
4.3	Acondicionamiento para sensores de temperatura.	25
4.4	Acondicionamiento para sensores de campo magnético.	26
4.5	Acondicionamiento para sensores de orientación solar.	27
4.6	Acondicionamiento para sensor de voltaje.	29

CAPITULO 5 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS

5.1	Introducción.	31
-----	---------------	----

5.2	Características de los circuitos impresos para SATEx 1.	32
5.3	Tarjeta de control.	33
5.4	Tarjeta de la microcomputadora.	37
5.5	Tarjeta de sensores.	38
5.6	Tarjeta de conectores.	40

CAPITULO 6 PRUEBAS DE VALIDACIÓN

6.1	Introducción.	47
6.2	Pruebas realizadas y por realizar a la tarjeta de conectores.	48
6.3	Pruebas realizadas y por realizar a la tarjeta de sensores.	49
6.4	Pruebas realizadas y por realizar a la tarjeta de control y multiplexaje.	52
6.5	Pruebas realizadas y por realizar a la computadora.	53
6.6	Pruebas de integración.	54
6.7	Pruebas realizadas y por realizar a los módulos externos del teledisquidor.	54

CAPITULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1	Conclusiones	56
7.2	Recomendaciones.	57

Referencias	58
--------------------	-----------

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Existe una amplia gama de tipos de satélites, los cuales pueden clasificarse atendiendo a varias de sus características, una clasificación es de acuerdo a su tamaño, en grandes, medianos y pequeños. La presente tesis está enfocada hacia instrumentos para satélites pequeños de órbita baja (hasta 1000 Km. de altura).

Los satélites están divididos en módulos (telemetría, comando, potencia, etc.), uno de los principales módulos es sin duda el de adquisición de datos. Este módulo puede utilizarse en un satélite como módulo principal o secundario, y en ambos casos puede operar como intermediario entre la estación terrena (ET) y el satélite.

El campo de los microsatélites no había sido muy amplio, sin embargo, en los últimos años su crecimiento ha sido motivado por un gran número de consideraciones, entre ellas la miniaturización y el alto desempeño de partes electrónicas, el advenimiento de nuevos materiales de alta resistencia y peso reducido y, la enorme capacidad de sistemas de cómputo diminutos. Hasta el momento se lanzan como cargas secundarias a precios relativamente bajos. Además, actualmente se tiene la viabilidad de construir satélites con diseños para periodos cortos de vida útil con lo cual se reduce el proceso de prueba, la documentación y las fuentes de aseguramiento. Estos factores contribuyen a reducir los costos de diseño y construcción, así como aquellos asociados con la puesta en órbita.

Un factor central en el futuro de los microsatélites es que el avance tecnológico dará aún más la posibilidad de generar sistemas funcionales de alta capacidad de cómputo y altos niveles de confiabilidad en paquetes de tamaño

modesto. Los diseños para tiempos de vida útil cortos, permitirán la sustitución económica y eficiente, de sistemas especiales con lo cual se logrará una constante actualización en dichos sistemas.

El campo de aplicación de estos satélites es muy amplio y abarca, entre otras, aplicaciones para canales de voz o datos con ancho de banda de 64 kbps y modulación digital PCM, Red Digital de Servicios Integrados, redes de telecomunicaciones en banda C, estudios de fenómenos globales de gran escala como son los cambios climatológicos, predicción en la actividad sísmica, monitoreo y control ambiental, así como la supervisión aérea, marítima y terrestre de regiones remotas para fines civiles y militares.

Indudablemente, el futuro de los satélites será de los "pequeños satélites" [1].

Entre algunos de los objetivos del proyecto SATEX 1 están la formación de recursos humanos especializados en proyectos especiales en las diversas instituciones participantes, el aprovechamiento de experiencias nacionales previas en materia aeroespacial, fomentar la participación de jóvenes investigadores y estudiantes, promover convenios de colaboración académica entre instituciones nacionales e internacionales, explotar al máximo los convenios con otros países, así como para planear el desarrollo del proyecto para dar continuidad al trabajo en esta área y para poder así utilizar soluciones y equipos desarrollados en futuros proyectos.

1.2 Constitución de un microsatélite

Un microsatélite está constituido por un grupo de subsistemas con tareas específicas que interactúan estrechamente, dándole así la capacidad de sobrevivencia necesaria para lograr cada una de sus misiones. Entre los subsistemas más importantes de un satélite están los siguientes, a los cuales se describe superficialmente:

- **Subsistema de Telemetría y Comando**.- Este subsistema le permite al satélite mantener comunicación con su estación terrena y/o con otros satélites. Con este subsistema el microsatélite recibe comandos de su estación terrena (ET),

es decir, mandatos o instrucciones para ejecutar acciones predeterminadas. Por medio de él también envía su telemetría, es decir, las mediciones de las variables que adquiere el satélite a través de sus sensores.

- **Subsistema de adquisición de datos.** - Es el módulo encargado de capturar y procesar la información de sensores locales, se encarga también de transmitir la información hacia el equipo de comunicaciones. También puede tener a su cargo el control de actuadores del satélite.
- **Subsistema de Potencia.** - Convierte la energía solar en corriente eléctrica por medio de celdas solares, además distribuye la corriente y voltajes eléctricos para cada uno de los sistemas que componen al microsatélite.
- **Subsistema de control de orientación.** - Este subsistema incluye los sensores necesarios para determinar el apuntamiento del vehículo; dependiendo del tipo de estabilización del satélite se pueden tener sensores en uno o más ejes. Asociado a él se encuentra el equipo de control digital que permite automatizar las funciones o tareas del vehículo.
- **Subsistema de propulsión y estabilización .-** Los satélites grandes utilizan sistemas activos compuestos por algún propulsor y válvulas que controlan las salidas de los gases propelente y oxidante. También pueden utilizar ruedas inerciales. La mayor parte de los microsatélites solo cuentan con sistemas pasivos como magnetotorques, bobinas de campo magnético y gradientes gravitacionales.
- **Subsistema de control térmico.** - Puede ser pasivo o activo, en los primeros se utilizan radiadores y disipadores para reflejar el calor en áreas expuestas a los rayos solares. En áreas no expuestas al sol se usan materiales aislantes cubiertos de color oscuro para retener el calor. Un buen control térmico dependerá de aspectos importantes en el diseño de la estructura como son el control de la conducción térmica y la disipación del calor. Estos dos factores tienen un papel importante para mantener la temperatura en los rangos tolerados. Los sistemas activos pueden ser calentadores o "petters" para incrementar o reducir temperaturas locales respectivamente.

- Subsistema de comunicaciones.- Esta formado por transpondedores, los cuales permiten recibir señales de comunicación (audio, video y datos), amplificarlas, cambiarles la frecuencia y retransmitirlas. Los microsátélites no siempre llevan transpondedores [1],[2].

1.3 Módulos que integran a SATEX 1 e instituciones responsables

El trabajo desarrollado para la presente tesis es parte de un proyecto multi-institucional para diseñar, construir y probar el microsátélite experimental SETEX 1, financiado por el Instituto Mexicano de Comunicaciones (IMC). Participan instituciones educativas y de investigación de todo el país, entre las cuales se encuentran la Universidad Autónoma de Puebla (UAP), Instituto Politécnico Nacional (IPN), el Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada (CICESE), el Instituto de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), el Centro de Investigación en Matemáticas (CIMAT) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

En la siguiente tabla se muestran los módulos o subsistemas desarrollados por cada institución.

Coordinación general y potencia
CINVESTAV.- Potencia y antenas
Aeronáutica.- Integración y pruebas
Equipos de comunicaciones (VHF1 y VHF2)
Experimento de comunicaciones ópticas.
Computadora de la carga útil óptica (CCUO)
Decodificador de tonos (DT)
Celdas solares
Estabilización y control
Facultad de ciencias.- Control térmico
Instituto de ingeniería.- Computadoras e instrumentación de abordo (teleadquisidor) y sensores.

1.4 Características globales del SATEX 1

El microsatélite es un cubo de 47 cm. por lado, cuatro de sus caras estarán cubiertas por celdas solares para generar la energía eléctrica por suministrar a sus subsistemas electrónicos. El SATEX 1 cuenta con dos cargas útiles principales, una para comunicaciones ópticas y una cámara de video, aunque debe enfatizarse que por tratarse de una primera experiencia de diseño, integración y validación, cada subsistema construido para el microsatélite representa una carga útil adicional, de las cuales se obtendrán importantes experiencias.

Para controlar el apuntamiento del satélite se cuenta con un sistema de estabilización pasivo formado por un gradiente gravitacional que una vez desplegado mide 6 metros de longitud con una masa terminal de 2.5 kg., además cuenta con tres bobinas de torque magnético (BTM) para generar pares de corrección en tres ejes. Para conocer la orientación del satélite se tiene un sensor burdo de sol formado por los paneles solares, también se cuenta con dos sensores finos de sol (SFS) que permitirán resolver la orientación del vehículo. Como sensores redundantes se tienen dos magnetómetros triaxiales, uno establece la realimentación para el control de las bobinas de torque magnético y el otro es la parte redundante del primero. Se tiene la posibilidad de medir corrientes provenientes de reguladores de voltaje y subsistemas electrónicos importantes como son los transmisores VHF, computadoras y electrónica de acondicionamiento de señales; se tienen también sensores de temperatura en sitios estratégicos como: baterías, cargas útiles y módulos electrónicos importantes. Adicionalmente se mide el voltaje de operación de la batería.

El satélite experimental requiere de un sistema electrónico que permita el acondicionamiento eléctrico de las señales de sensores y que permita realizar operaciones de forma automática para la adquisición de datos locales, ejecución de algoritmos de control y para regular la comunicación entre computadoras abordo, por lo cual debe contar con una arquitectura capaz de manejar las interfaces requeridas por los diversos subsistemas del vehículo y que permita resolver todos los aspectos relacionados con su programación.

Este subsistema es el teleadquisidor presentado en esta tesis.

1.5 Principales actividades a realizar por el teleoperador del SATEx1

La primera acción del teleoperador será detectar el instante en que es liberado de su lanzador, después de ocurrir la liberación y de una espera de tiempo definida por el sistema de lanzamiento, el teleoperador liberará las antenas de SATEx 1. Posteriormente y de acuerdo con un calendario de tareas y restricciones de estabilización, se procederá a liberar el gradiente gravitacional. Una vez realizadas estas primeras tareas, durante la vida útil del vehículo se obtendrá un registro de las variables eléctricas y ambientales en diversos puntos críticos. El teleoperador mantendrá comunicación con tierra en puntos estratégicos del territorio nacional para que SATEx1 pueda recibir comandos y transmitir su telemetría e imágenes. También se mantendrá una constante comunicación con los otros submódulos de abordo con el fin de transferir comandos, diagnóstico, detección de fallas y transferencia de programas para reconfiguración.

ARQUITECTURA DEL TELEADQUISIDOR DE DATOS

2.1 Introducción

El teleadquisidor de datos es un sistema modular de adquisición y procesamiento de datos que puede ser programado remotamente desde un procesador maestro (PM) y que puede ser utilizado individualmente o en grupo (red) para instrumentar vehículos especiales pequeños, medianos y grandes en órbita baja (hasta 1000 Km. de altura).

El teleadquisidor de datos puede utilizarse como un subsistema de procesamiento secundario o como un subsistema principal. Debido a que su comunicación con el exterior es por medio de puerto serie, se puede conectar a un procesador maestro o a tantos procesadores esclavos (según sea el caso) como se requiera. Ellos pueden ubicarse a distancias pequeñas o a grandes, en este último caso entendiéndose por medio de equipo de comunicaciones.

El teleadquisidor de datos que utilizará el microsatélite BATEX 1 ha sido desarrollado por subsistemas de tal manera que la presente tesis abarca principalmente la parte de acondicionamiento de señales, electrónica de control y la construcción de los impresos que componen a la computadora del teleadquisidor de datos.

El teleadquisidor cuenta con cinco tarjetas, en las cuales residen dos microcontroladores, periféricos, memoria, multiplexaje y electrónica de acondicionamiento de señales (acondicionamiento, filtrado y recorte) para capturar muestras de sensores locales típicos en aplicaciones especiales como son: temperatura, voltaje, corriente, campo magnético y orientación solar.

2.2 Módulos del teleadquisidor de datos

El teleadquisidor de datos es un sistema modular constituido por cinco tarjetas, las dos primeras constituyen, una, la computadora principal del teleadquisidor, y la otra, la computadora redundante que se utilizará en caso de que falle la primera. Cada microcomputadora contiene un microcontrolador 80C166, temporizadores, control de interrupciones, convertidor A/D de 10 bits, 256 Kbytes de memoria RAM y 64 Kbytes de memoria EEPROM. Las 3 tarjetas restantes contienen electrónica de control, acondicionamiento, filtrado, recorte, conectores hacia el exterior y multiplexaje para conmutar de computadora principal a redundante de tal forma que en un momento dado cualquiera de ellas pueda tener acceso a toda la instrumentación del vehículo.

El teleadquisidor tiene sensores internos, de ellos 6 son de corriente y uno de temperatura, cuenta con acondicionamiento para 14 señales de sensores externos al teleadquisidor y además tiene 28 entradas adicionales de sensores externos las cuales deben llegar previamente amplificadas o acondicionadas de 0 a 5 volts de CD. También cuenta con canales libres de conversión analógico digital y líneas de polarización para sus periféricos.

El teleadquisidor del microsatélite SATEX 1 tiene electrónica interna de acondicionamiento para los siguientes sensores:

- 4 de temperatura (extras al suyo)
- 2 Magnetómetros triaxiales
- 2 Sensores finos de sol biaxiales

La electrónica de acondicionamiento de los 27 sensores restantes se encuentra fuera del teleadquisidor, estos sensores son los siguientes:

- 1 de voltaje
- 3 de temperatura
- 18 de corriente
- 5 entradas A/D libres

Con excepción de los microcontroladores, los componentes electrónicos del teleadquisidor son CMOS de tipo militar para asegurar cierta tolerancia de operación en ambiente espacial. Los componentes militares aseguran su operación en el intervalo de temperatura de -55 a 125 °C y, por otro lado, la tecnología CMOS soporta los niveles de radiación que se esperan obtener en la órbita baja de operación del SATEX 1 (800 Km.)

2.3 Control del suministro de energía para submódulos electrónicos del teleduicador y para la electrónica de control de los actuadores del microsatélite

Durante todo el proceso de diseño de la instrumentación y de las computadoras de SATEX 1, estuvo siempre presente el objetivo del ahorro de energía. La cual es vital en microsatélites, debido a que no se cuenta siempre con el total de energía eléctrica requerida. Como en SATEX 1 los paneles solares están colocados sobre el cuerpo del satélite (cubo de 47 cm de lado) no se tiene captación de rayos solares en todos ellos, por lo cual la energía eléctrica generada es reducida.

Para permitir el control y ahorro de energía eléctrica en SATEX 1 el diseño de la electrónica del teleduicador previó la posibilidad de encender su electrónica por módulos, de tal forma que si por ejemplo en cierta misión del satélite se requiere exclusivamente el monitoreo de alguna o algunas variables, no se requiere tener energizada a la electrónica completa esto evitará el consumo innecesario de energía en el satélite.

De esta forma, la instrumentación desarrollada permite el control flexible de la energía eléctrica, el cual es completamente transparente para el equipo de control de misión que trabaja en la estación terrena del SATEX 1. Esto es, cuando se definen las macrofunciones que determinan el trabajo del satélite durante una misión, el personal en tierra no tiene que definir absolutamente nada para hacer un uso eficiente del consumo de energía en el microsatélite. Esto se debe a que cada macrofunción que se desarrolló para SATEX 1 realiza automáticamente el encendido de la electrónica requerida para efectuar la operación indicada. Para mayores detalles consultar la referencia [3].

En la figura 2.1 se muestran en diagrama de bloques los diversos módulos del teleduicador los cuales pueden energizarse o desenergizarse de acuerdo con la misión requerida.

Como se deduce, la computadora principal siempre está encendida, en tanto que la computadora de respaldo puede activarse por medio del detector de tonos (sistema digital que controla un equipo de comunicaciones redundante en el satélite) y por la computadora del experimento de la carga útil óptica (otro subsistema experimental incluido en el satélite).

Para que se pueda efectuar el encendido y apagado de equipos es necesario que un pequeño número de componentes electrónicos permanezca energizado, de tal forma que las activaciones o desactivaciones se puedan realizar en cualquier momento. Este bloque se presenta en la figura 2.1 bajo el nombre de electrónica siempre encendida, en él, se tienen computas que red en el microsatélite reciben las órdenes de conmutación de las computadoras y

manejadores de líneas para los puertos serie de los sistemas digitales que se encuentran enlazados en

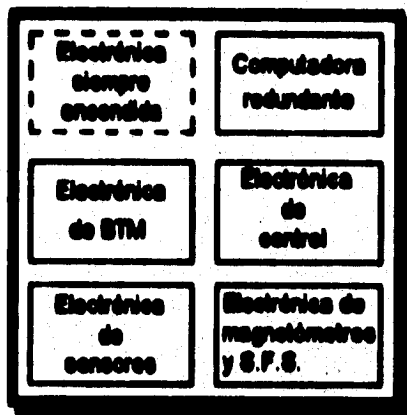


Figura 2.1 Módulos internos del teleadquisidor.

Se tienen también en este bloque multiplexores digitales que aceptan salidas provenientes de las computadoras (principal o redundante) con los que (dependiendo que computadora se este usando) se envían señales eléctricas para encender o apagar las electrónicas de control, de bobinas de torque magnético, magnetómetros y la electrónica de sensores todas ellas mostradas en la figura 2.1.

Cuando se diseñaron los comandos que la estación terrena puede enviar al SATEX 1, se identificaron los diversos bloques que deberían ser energizados o desenergizados por separado, entre ellos se identificó que cuando se recibe información de los sensores del SATEX 1, no siempre se requería energizar a la electrónica de los magnetómetros o la de bobinas de torque magnético (BTM), por tal razón la electrónica de sensores se enciende sólo cuando se capturan datos para telemetría.

De igual forma se detectó la existencia de misiones en donde exclusivamente se reciben lecturas de magnetometría, por lo cual la electrónica asociada a este módulo también puede activarse o desactivarse (ver figura 2.1). Lo mismo sucede respecto a la electrónica de BTM, en la cual se tienen multiplexores digitales de 2 a 1 para enviar los puleos de encendido de acuerdo con la computadora que se tenga disponible.

En la figura 2.1 también aparece el bloque de electrónica de control, en donde residen manejadores de línea para interactuar con el equipo de comunicaciones del satélite. El bloque contiene además multiplexores digitales de 2 a 1 que permiten que cualquiera de las computadoras (principal o redundante)

puede controlar las líneas de selección de los multiplexores por donde pasan las señales de todos los sensores (internos y/o externos) del teleadquisidor. El bloque contiene también compuertas que permiten que diversos actuadores y equipos puedan ser encendidos por las computadoras y otros equipos. En particular se tienen dos líneas de control redundantes para activar el gradiente gravitacional, cuya orden de activación puede provenir ya sea de la computadora principal, de la computadora redundante o del decodificador de tonos. Lo mismo sucede en el caso de las antenas.

Se tienen otras compuertas que permiten que cualquiera de los equipos de comunicaciones o la cámara CCD del satélite puedan ser energizados por medio de un comando enviado de las computadoras (principal o redundante).

Para tener una idea global de la instrumentación desarrollada, pero ahora desde el punto de vista de la energización de módulos electrónicos del teleadquisidor, se presenta la figura 2.2.

2.4 Otros componentes del teleadquisidor

Como se ha indicado en los párrafos anteriores, el teleadquisidor de datos cuenta con dos computadoras intercambiables, electrónica de control para conmutación de computadoras y electrónica de acondicionamiento para 21 sensores. Sin embargo, en vehículos especiales aun cuando se trata de sistemas de control distribuido, es común la presencia de teleadquisidores remotos que alrededor de ellos tienen sensores dispersos (relativamente cercanos) de los cuales no es recomendable conducir sus señales eléctricas hasta el teleadquisidor sin una previa amplificación y filtrado. De la misma forma, el teleadquisidor de la presente tesis contiene sensores externos, los cuales necesitan de un acondicionamiento local para posteriormente conducir sus señales eléctricas a la computadora del teleadquisidor. En la figura 2.3 se muestran los sensores externos al teleadquisidor en el microsatélite SATEX 1.

Respecto a los sensores de corriente externos al teleadquisidor, se decidió realizar el senseo y su acondicionamiento externos para evitar el tendido de cables de relativa alta corriente de un subistema a otro. Esta técnica permite reducir, aunque en cantidades pequeñas, el peso del equipo instalado, el cual es una de las restricciones más importantes en equipo espacial. Por otro lado, se evita también el uso de conectores de alta corriente de entrada y salida de un subistema a otro; este problema puede parecer sencillo sin embargo debe recordarse que los diversos módulos de equipos especiales van integrados en contenedores metálicos, lo cual implica que además de las conexiones entre conectores externos, es necesaria la interconexión entre conectores y circuitos impresos de cada módulo, lo cual da una idea del ahorro en cuanto a conexiones de líneas de potencia.

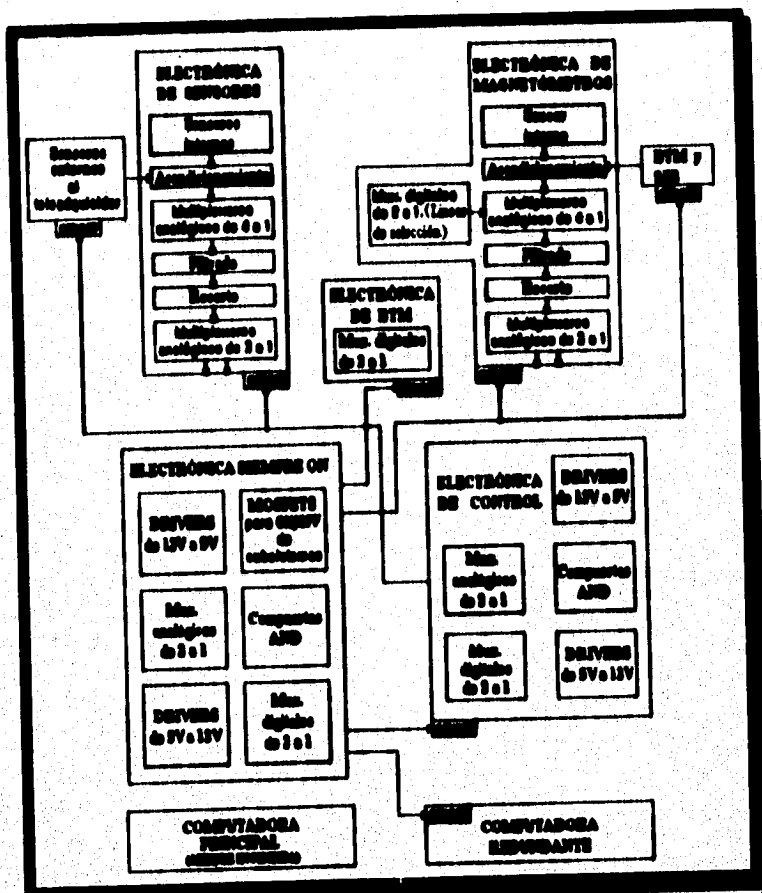


Figura 2.2 Diagrama de bloques del teleseguimiento desde el punto de vista de suministro de energía

En particular, las corrientes que se miden corresponden a los siguientes equipos:

- 1 Bateria
- 6 Paneles
- 6 Bobinas de torque magnético
- 2 Equipos de comunicaciones VHF1 Y VHF2

- 1 Cámara CCD
- 1 Computadora CUO
- 1 Decodificador de tonos

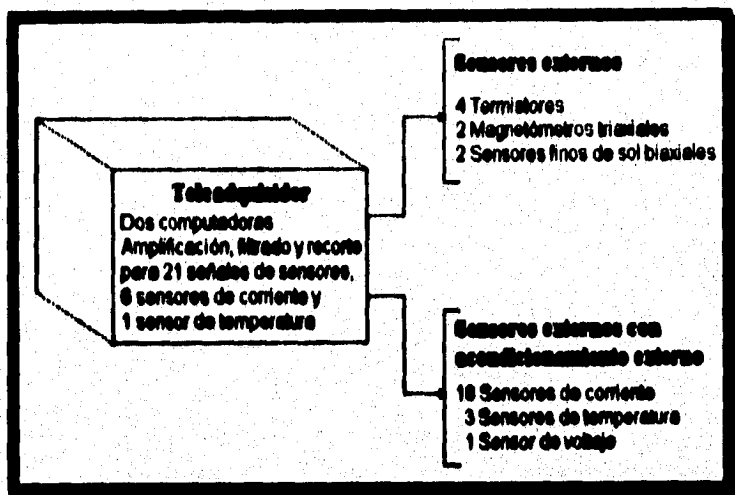


Figura 2.3 Composición global del teleadquisidor de datos desarrollado.

Por otro lado, también se cuenta con sensores de temperatura y voltaje externos los cuales reciben acondicionamiento fuera del teleadquisidor, ellos son:

- 1 Sensor de voltaje para batería
- 1 Sensor de temperatura para batería
- 1 Sensor de temperatura para VHF1 y VHF2.
- 1 Sensor de temperatura para la computadora CUO

Los detalles de los sensores y su respectivo acondicionamiento de señales se dan en el capítulo 4.

La arquitectura completa del teleadquisidor de datos desarrollado es la que se muestra en la figura 2.4. En la figura se muestran las tarjetas que componen al teleadquisidor así como las interconexiones de este con subsistemas externos, todos ellos dentro del microestadio BATEX 1.

Las 5 tarjetas que se observan en el centro de la figura 2.4 están cubiertas por un contenedor metálico, el cual está en proceso de diseño, el material de construcción será aluminio especial. La forma del contenedor será como la que se muestra en la figura 2.5, como se observa las interconexiones hacia el exterior

están constituidas por conectores (también de tipo miller) por donde entrarán los señales de sensores externos, y por donde también saldrán las líneas de control para los actuadores del microsatélite. El conector metálico cumple varias funciones siendo las principales: la protección física de los circuitos impresos, protección electromagnética previniendo principalmente del equipo de comunicaciones del satélite, como medio de disipación térmica, etcétera.

Como se ha mencionado el telesatélitador fue diseñado para operar como procesador maestro o esclavo dentro de una red de control distribuido de procesos. Como es lógico pensar se requiere de software especializado para controlar el tráfico de información cuando hay más de un procesador instalado, para este propósito en otra tesis ya terminada [3] se describe con amplitud la programación desarrollada para el telesatélitador. Por esta razón en esta tesis sólo se cubren los aspectos de hardware relativo al telesatélitador. En el siguiente capítulo se detallarán las características de las microcomputadoras del SATEX 1.

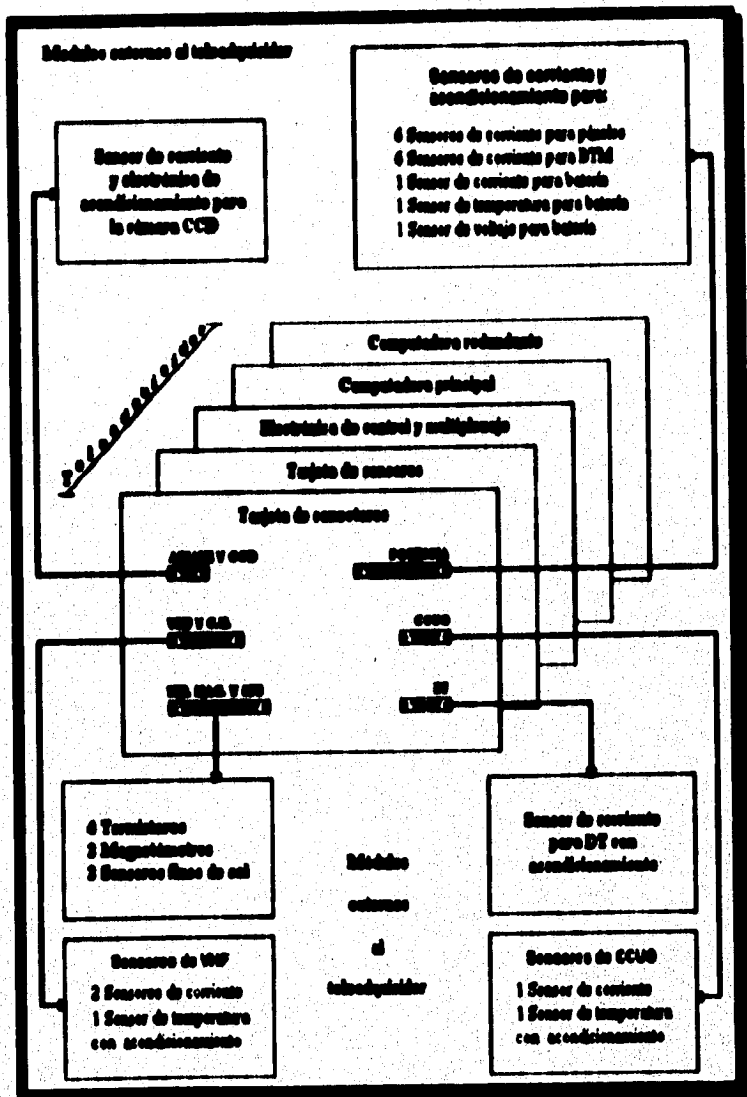


Figura 2.4 Tarjetas que componen el subistema de teleadquisición de datos para el SATEX 1

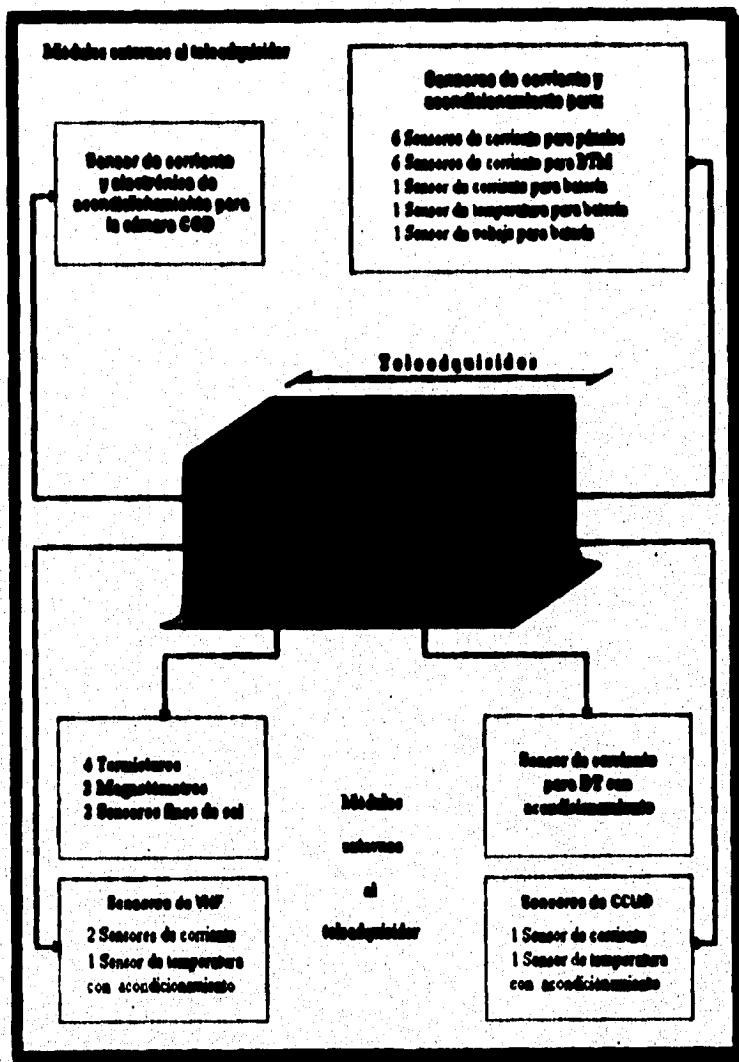


Figura 2.5 Subsistema de teleduquidación de datos para SATEX 1

MICROCOMPUTADORAS UTILIZADAS Y PERIFÉRICOS

3.1 Introducción

En las primeras etapas del desarrollo del proyecto BATEX 1 se consideró realizar un diseño personalizado de microcomputadoras con un microcontrolador, sin embargo también se identificó la posibilidad de utilizar una tarjeta comercial para automatización de procesos. Si bien esta última decisión reduce ampliamente la carga de diseño del sistema de control digital, genera confrontaciones muy importantes para el proyecto, debido a que sus componentes no son de confiabilidad militar, lo cual se requiere como mínimo para este proyecto.

Después de una evaluación exhaustiva de las posibilidades de solución (las anteriores y otras más) se concluyó que debería utilizarse una arquitectura comercial ya probada y que contara con amplio apoyo para depurar y validar la programación del proyecto. Para incrementar el desempeño y la confiabilidad del sistema se estableció también como objetivo el rediseñar y adaptar la arquitectura comercial para integrar componentes de tipo militar en la tarjeta elegida y para realizar cambios particularizados con el proyecto. Esta determinación obligó una amplia búsqueda de componentes militares, así como su consecuente adquisición en el extranjero (implicando de 3 a 5 meses de espera dependiendo del componente) para después confirmar la viabilidad de la solución propuesta.

En este capítulo se describen las características del hardware de las microcomputadoras que se utiliza en el proyecto, en el siguiente capítulo se aborda el tema del hardware asociado con el acondicionamiento de señales provenientes de sensores.

3.2 Computadoras integradas al teleadquisidor

El núcleo central del sistema de adquisición de datos para aplicaciones de control distribuido consta de dos microcomputadoras con amplios periféricos, cada una de ellas contenidas en una tarjeta multicapa de 10.2 cm por 15.3 cm.

Cada computadora está basada en un microcontrolador SIEMENS CMOS de 16 bits. La referencia de tiempo del sistema es un oscilador de 40 Mhz, de tal forma que todas las especificaciones de tiempo estén referidas a un reloj de 20 Mhz.

Con esta referencia el microcontrolador tiene un desempeño de hasta 10 millones de instrucciones por segundo, lo cual lo hace atractivo para aplicaciones de control de procesos en tiempo real. Debe recalcar que su arquitectura interna utiliza principios "pipe line", en su caso de 4 etapas para lograr tal desempeño, además la mayor parte de sus instrucciones se ejecuta en un ciclo de tiempo de 100 nseg. Otras de sus características de desempeño son las siguientes:

- Multiplicaciones de 16 bits por 16 bits en 500 nseg.
- División en 1 mseg.
- Stack del sistema de tipo cache.

La arquitectura del microcontrolador es del tipo Von Neumann, la cual se muestra en diagrama de bloques en la figura 3.1.

3.3 Periféricos del microcontrolador

En cuanto a periféricos, las características más destacadas del microcontrolador SIEMENS son las siguientes:

- RAM interna de 1 Kbyte.
- ROM interna de 8 Kbyte.
- Interfaz para expansión de memoria externa que soporta tres configuraciones de bus además de capacidad de segmentación.
- Sistema de interrupciones con 16 niveles de prioridad, que permite detectar 32 fuentes de interrupción con vectores de interrupción independientes.
- Controlador de eventos periféricos de 8 canales el cual permite transferir datos por medio de interrupciones en modo sencillo o por bloque, y el cual permite salvar o actualizar el estado del sistema durante solicitudes de interrupción.
- 76 líneas de entrada y salida con capacidad para direccionarlas individualmente.
- Convertidor A/D de 10 canales cada uno de 10 bits y con tiempo de conversión de 9.75 μ seg.

- Puente de 16 canales que se puede utilizar como unidad de captura o comparación con 2 bases de tiempo independientes (con resolución de 400 ns). Una de los posibles usos, es el establecimiento de salidas tipo PWM.
- Dos unidades de tiempo de propósito general de 16 bits cada una, una con resolución de 400 ns y otra con 200 ns de resolución.
- Dos puertos serie con generador de baudaje independiente.
- Temporizador tipo "watchdog" con intervalos de tiempo programables.
- Rango dinámico de temperatura de operación de -40°C a 110°C.

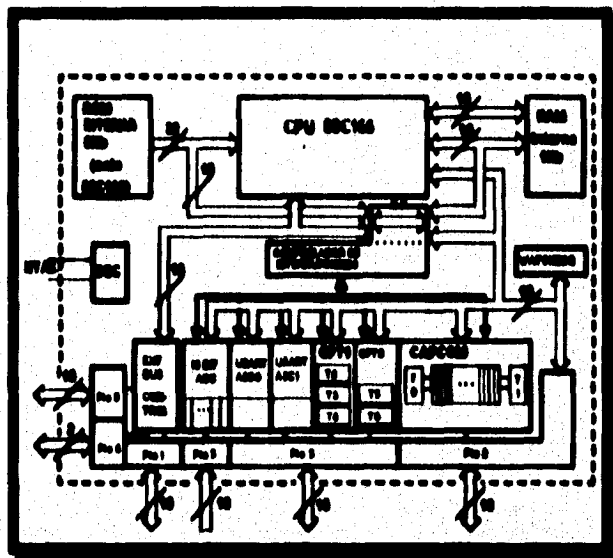


Figura 3.1 Arquitectura del microcontrolador utilizado.

Adicionalmente este microcontrolador cuenta con amplio apoyo para el desarrollo de sistemas, los cuales permiten reducir los tiempos de desarrollo y validación de soluciones durante el transcurso de un proyecto. En particular el apoyo de desarrollo permite programar el equipo con un lenguaje de alto nivel debido a que cuenta con un compilador "C". Adicionalmente en caso de que se requieran funciones optimizadas, se puede utilizar un ensamblador, un ligador, un localizador de código, bibliotecas de programas y convertidores de código. Cuenta además con un simulador de programas el cual es ideal para la familiarización inicial con el sistema y para el seguimiento paso a paso de programas de entrenamiento.

La microcomputadora elegida para el desarrollo y validación del software del proyecto se muestra en la figura 3.2

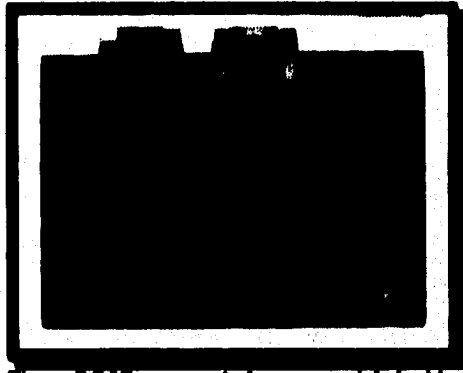


Figura 3.2 Microcomputadora comercial elegida.

Si bien las características citadas en los párrafos anteriores constituyen un sistema de desarrollo atractivo, la tarjeta comercial elegida cuenta además con dos opciones adicionales que permiten la depuración y pruebas de programas con alta eficiencia para el desarrollo de proyectos, ellos son:

- Operación del sistema como un emulador en circuito de tiempo real.
- Programas monitores, tanto en la tarjeta como en la PC, los cuales permiten realizar las depuraciones y pruebas desde una PC.

Una vez tomada la decisión de adaptar y personalizar una tarjeta comercial (microcomputadora) para vuelo espacial, se comenzó a trabajar en forma paralela en los aspectos siguientes:

- La utilización de la microcomputadora comercial para desarrollar el software requerido, el cual se encuentra descrito en la referencia [3].
- Adaptación y personalización de una microcomputadora (en una tarjeta) para vuelo espacial, cuyo proceso de construcción también forma parte de la presente tesis, debido a que esta tarjeta es la que se incluye dentro del telesiguiador de datos.

Deben subrayarse otros de los cambios para la tarjeta de vuelo como son el uso extensivo de componentes de montaje superficial con características militares tanto en componentes pasivos como en activos. La eliminación de partes o circuitos no utilizados, la eliminación y/o reubicación de conectores para hacer posible la integración de tarjetas del telesiguiador en tandem y el diseño multicapa del nuevo circuito impreso. De esta forma se procedió a desarrollar la computadora del satélite, el proceso completo se describe en el capítulo 5.

En el siguiente capítulo se aborda el tema de la electrónica de acondicionamiento diseñada para el teleseguimiento de datos del microsatélite SATEX 1.

ELECTRÓNICA DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

4.1 Introducción

El teleadquisidor de datos que se presenta en esta tesis tiene la capacidad para recibir 48 señales de sensores y adicionalmente cuenta con 2 entradas A/D totalmente libres y disponibles en uno de los conectores externos del equipo.

Como se ha mencionado en los capítulos previos, el convertidor A/D utilizado cuenta con 10 canales de 10 bits de resolución cada uno. Los primeros 4 canales están conectados a multiplexores analógicos de 8 a 1 de tal forma que con ellos se pueden senear 32 señales de sensores. Los siguientes 4 canales también están conectados a multiplexores analógicos, pero en este caso de 4 a 1, con los cuales se pueden senear hasta 16 señales eléctricas; los 2 canales restantes están libres y accesibles por medio de uno de los conectores del teleadquisidor.

De esta forma, con los primeros 8 canales A/D mencionados se pueden leer hasta 48 señales de sensores. De ellos el teleadquisidor ocupa 43 líneas para obtener información de 43 señales eléctricas provenientes del SATEX 1, las 5 entradas restantes también se encuentran disponibles por medio de conectores externos.

SATEX 1, como se ha mencionado en el capítulo 2, cuenta básicamente con tres tipos de sensores, el primer grupo está constituido por aquellos sensores localizados en el interior del gabinete del teleadquisidor, a los cuales se les aplica un acondicionamiento eléctrico que reside también dentro del gabinete (ver figura 2.3). El siguiente grupo está formado por sensores externos al teleadquisidor cuyas señales eléctricas se acondicionan dentro del gabinete del equipo de adquisición de datos. El tercer grupo lo constituyen sensores externos cuyas señales eléctricas se acondicionan también en el exterior (ver figura 2.4).

En este capítulo se dan los detalles de la electrónica de acondicionamiento utilizada para acondicionar los voltajes de operación de cada sensor utilizado en el SATEX 1.

En el siguiente capítulo se describen los detalles de diseño y construcción de los diversos impresos que componen globalmente al subsistema de adquisición de datos del microsatélite experimental (el teleadquisidor).

4.2 Acondicionamiento para sensores de corriente

En el SATEX 1 se realizan mediciones de corriente eléctrica en diversos subsistemas, en algunos casos para determinar la cantidad de energía capturada por el vehículo, y en el resto de los casos para conocer los consumos energéticos de subsistemas importantes.

En el inicio del proyecto se consideraron diversas opciones existentes para medir corriente directa, de ellas se optó por la utilización de grupos de resistencias de muy bajo valor ensambladas en paralelo. El sensor obtenido se coloca en serie con la carga de la cual se desea conocer su flujo de corriente. Debido a que la resistencia del sensor es muy baja (un miliohm) se obtiene una disipación energética mínima en el sensor y por consiguiente una caída de potencial también mínima.

Los sensores se ubicaron entre la carga y tierra para evitar la saturación de amplificadores operacionales en la parte de acondicionamiento. Sin embargo, en el caso de subsistemas energizados con fuentes duales se optó por ubicar los sensores entre la carga y la fuente de alimentación, de tal forma que se pudiera realizar el monitoreo de corrientes tanto en fuentes positivas como en fuentes negativas. En este caso, la electrónica de acondicionamiento varía un poco, como se muestra en la figura 4.1b.

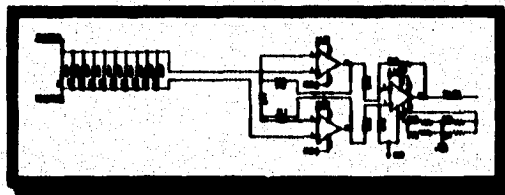


Figura 4.1a Sensor de corriente entre la carga y GND.

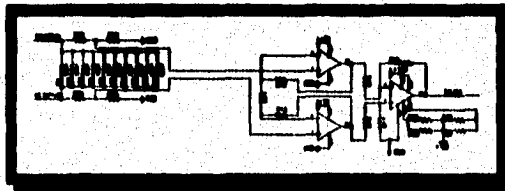


Figura 4.1b Sensor de corriente entre la carga y VCC.

El acondicionamiento para los sensores de corriente contempla el uso de un amplificador de instrumentación cuya ganancia se estableció con base en los valores extremos de las corrientes por medir.

En el SATEX 1 se tienen 4 rangos dinámicos de corrientes, de tal forma que las ganancias de los amplificadores de instrumentación corresponden a lo indicado en la tabla 4.1.

0 a 1	41	100
0 a 2	21	100
0 a 4	21	50
0 a 6	21	33

Tabla 4.1 Ganancias teóricas de los amplificadores de instrumentación.

Una vez amplificadas las señales provenientes de sensores de corriente, se llevan éstas al subsistema de multiplexaje (ver sección 4.1). Las 8 salidas de los multiplexores, contienen la electrónica de filtrado y recorte, las cuales reducen el ruido y limitan la respuesta de cada sensor al umbral de voltaje tolerado por el convertidor A/D. De esta forma y con ayuda del multiplexaje se permitió también la reducción del número de etapas de filtrado y recorte de la instrumentación del satélite. Los circuitos de filtrado y recorte se dan en la figura 4.2.

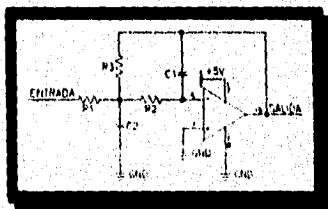


Figura 4.2 a) Filtro paso bajas.

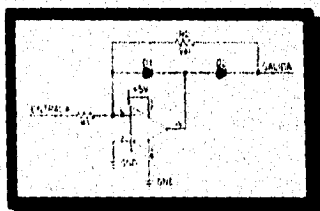


Figura 4.2b Limitador de voltaje.

4.3 Acondicionamiento para sensores de temperatura

En el vehículo espacial es necesario realizar mediciones de temperatura para supervisar el estado de operación de subsistemas críticos. Como se sabe en el espacio y en condiciones de microgravedad no existen corrientes convectivas que puedan homogeneizar las temperaturas de cuerpos cercanos.

Por esta razón en SATEX 1 los subsistemas electrónicos que disipan calor se encuentran conectados físicamente a estructuras metálicas, de tal forma que se propicie la conducción de calor por contacto. A pesar de las precauciones anteriores, es importante monitorear temperaturas en sitios estratégicos, las cuales se pueden utilizar entre otras cosas para determinar la activación y/o desactivación de subsistemas dependiendo de los niveles de temperatura detectados. Con esto se persigue que los equipos se utilicen la mayor parte del tiempo bajo condiciones normales de temperatura y de esta forma prolongar la vida de subsistemas electrónicos.

Todos los vehículos especiales se ven sometidos a grandes esfuerzos producidos por los cambios de temperatura que se encuentran en el espacio. Los cuerpos expuestos directamente a la radiación solar pueden alcanzar temperaturas por arriba de los 150 °C, y en cambio los cuerpos que quedan a la sombra pueden alcanzar temperaturas por debajo de los -50 °C. En el caso de SATEX 1 la temperatura interna se verá afectada por el tiempo de exposición al sol en cada una de sus caras por lo cual una de las formas que existen para modificar su temperatura consiste en controlar la exposición de las caras del satélite respecto al sol. De esta manera el monitoreo de temperaturas se utilizará también como base para modificar el apuntamiento del microsatélite y su velocidad angular.

Por otro lado, el monitoreo de temperaturas en el satélite será muy importante para validar el modelado térmico del satélite que se realiza como parte del proyecto global.

En SATEX 1 se instalaron únicamente 8 sensores de temperatura los cuales de acuerdo con opiniones de expertos son suficientes para monitorear pequeños satélites. Un sensor se utiliza para medir la temperatura de operación de la batería, otro para los equipos de comunicaciones, uno instalado en la carga útil del experimento de comunicaciones ópticas, otro ubicado dentro del teleadquisidor y cuatro más instalados en los paneles solares.

De acuerdo con resultados obtenidos por otro grupo responsabilizado del modelado térmico y estructural, se sabe que la temperatura interna del microsatélite estará en algún valor entre -5 °C y 12 °C, lo cual coincide con datos reportados por otros satélites experimentales que han volado exitosamente. Por

estas razones se eligieron como sensores de temperatura a termistores que tienen un rango de operación entre -30°C y 100°C .

Cada uno de los sensores de temperatura utilizados se colocó en un arreglo de tipo puente de "Wheatstone" como se indica en la figura 4.3. El puente se polariza con $+5\text{V}$ y tierra, en tanto que su salida se lleva a un amplificador diferencial con una ganancia de 2, cuya salida se conduce a una etapa de multiplexaje. La salida de esta última etapa se conecta a su vez a electrónica de filtrado y recorte, similar a la descrita en la electrónica para sensores de corriente (ver sección 4.2).

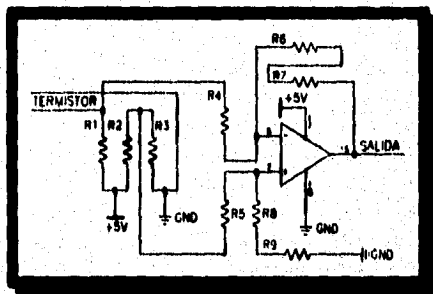


Figura 4.3 Sensor de temperatura.

4.4 Acondicionamiento para sensores de campo magnético

El microsatélite experimental tiene dos formas de conocer su orientación, una es por medio de sensores de sol y la otra por medio de un sensor de campo magnético terrestre, en tres ejes. Además, en SATEX 1 es de vital importancia conocer las características del campo magnético terrestre que lo circunda, de tal forma que se puedan accionar las bobinas de torque magnético para generar momentos de corrección de actitud en cualquiera de sus tres ejes. Por esta razón se incluye un sensor triaxial de campo magnético el cual por razones de seguridad se encuentra duplicado en el satélite. Algunas de las características principales de este sensor se dan en la tabla 4.2.

Como se observa en la siguiente tabla, la salida del sensor de campo magnético terrestre es un voltaje entre -4V y 4V . Como se comprende, este tipo de señal no puede aplicarse directamente a los convertidores A/D, por lo cual la salida de este sensor se llevó a un amplificador operacional en el cual se aplica un voltaje de referencia como se observa en la figura 4.4. El operacional elimina parte del rango dinámico que no se presentará durante la vida útil del satélite, y además permite que la salida ya acondicionada varíe exclusivamente entre 0 y 5 volts.

+5VDC a 20 mA
-5VDC a 20 mA
+4V a -4V analógicos
±1 Gauss
0 a 400 Hz.
30 gramos
0.02% / °C
0.1% / °C
2 mV

Tabla 4.2 Características del sensor de campo magnético.

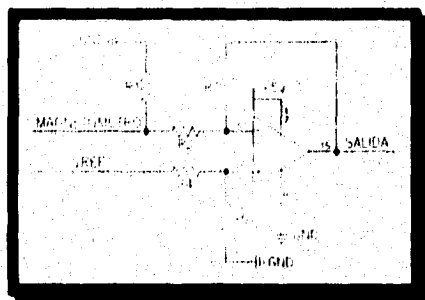


Figura 4.4 Sensor de campo magnético.

Las seis salidas acondicionadas de magnetometría se conducen entonces a la etapa de multiplexaje en cuya salida también se tienen las etapas de filtrado y recorte.

4.6 Acondicionamiento para sensores de orientación solar

Como ya se mencionó, SATEX 1 utiliza sensores de sol para determinar su orientación cuando los rayos solares inciden sobre el sensor de sol. Debido a que estos sensores tienen un rango de vista limitado, se planeó la adquisición de dos sensores finos de sol los cuales se ubicarán en caras adyacentes del satélite. Con ellos se podrá obtener información en tiempo real durante movimientos angulares continuos, aunque se presenten espacios angulares significativos en donde no se podrá determinar la orientación del satélite. Esta decisión fue tomada por el grupo que realizó los algoritmos del control de orientación del satélite.

Las características de los sensores finos de sol elegidos se dan en la siguiente tabla.

± 12 volts a 5 watts
± 5 volts
$\pm 60^\circ$
$\pm 20^\circ$
0.6 Kg

Tabla 4.3 Características de los sensores finos de sol.

Como se observa en la información presentada, la salida del sensor fino de sol es una señal eléctrica que varía entre -5V y 5V por lo cual antes de enviarse a los convertidores A/D del teleadquisidor se le realiza un acondicionamiento similar al de los magnetómetros para obtener una salida que varía entre 0 y 5 volts

En la figura 4.5 se presenta el circuito de acondicionamiento para sensores finos de sol.

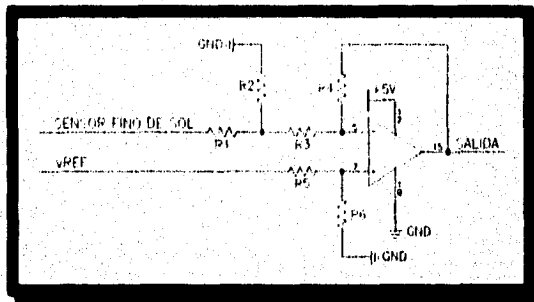


Figura 4.5 Acondicionamiento para sensores finos de sol.

Debido a que el sensor es biaxial se tienen dos etapas de acondicionamiento similares por sensor, de tal forma que se utilizan 4 etapas similares para realizar el acondicionamiento de los dos sensores finos de sol biaxiales. Las cuatro salidas se llevan a la etapa de multiplexaje, después de la cual se tiene la electrónica de filtrado y recorte, de forma similar a los sensores ya descritos.

Por otro lado, SATEX 1 también cuenta con sensores burdos de sol, los cuales permiten conocer de manera instantánea cuál de las caras del satélite está en dirección del sol. Este sensor burdo está compuesto por los paneles solares del vehículo, de tal forma que para determinar la ubicación del sol respecto al

satélite solo se realizan mediciones de corriente eléctrica en cada uno de los paneles, y aquella que sea mayor indicará la ubicación relativa del sol.

Lo anterior se ilustra en la figura 4.6

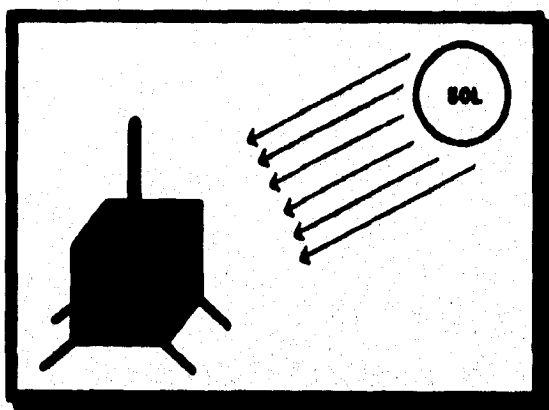


Figura 4.6 SateX 1

4.6 Acondicionamiento para el sensor de voltaje

El único voltaje que se mide en el satélite, es el de la batería, el cual se monitorea constantemente para conservar en cierto rango (mayor o igual al 90%) el valor de su carga. Esta actividad es aún más importante durante los eclipses debido a que en estos casos el total de la energía consumida proviene de la batería.

Como se ha mencionado en párrafos anteriores (sección 2.3) la instrumentación del SATEX 1 se diseñó para realizar diversas labores sin ser necesario que el total de equipos se encuentren energizados. Esto implica que en la instrumentación desarrollada se introdujeron módulos que permiten la conexión y/o desconexión de equipos, de tal forma que a través de la programación que controla al SATEX 1 se puede realizar la administración del consumo energético en el vehículo espacial. De la misma manera, cuando el satélite se programa para realizar algún tipo de misión durante su viaje orbital, es posible (por medio de software) interrumpir procesos para evitar el deterioro de la batería aún cuando el satélite se encuentre fuera del alcance de las estaciones terrenas que lo supervisan.

El circuito de acondicionamiento que permite sensor el voltaje de la batería está constituido por un divisor de voltaje y un amplificador operacional que se

utiliza en configuración de seguidor. Su salida varía de 0 a 5 volts los cuales representan variaciones de 0 a 20 volts, este último valor corresponde al voltaje máximo de la batería. Esta salida a su vez se lleva a la etapa de multiplexaje, después de la cual se tienen también las etapas de filtrado y recorte para el sensor.

En el siguiente capítulo se describe el proceso de desarrollo de los circuitos impresos del telemedicador.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS

6.1 Introducción

Algunas de las restricciones más importantes que deben satisfacer los equipos espaciales son consumo de potencia, volumen y peso reducidos. De tal forma que cuando se diseñan estos equipos se pueden alcanzar objetivos como los anteriores a través del uso de materiales novedosos (de alta resistencia y ligeros) y con la reducción o miniaturización de la instrumentación requerida. Respecto a la instrumentación diseñada para SATEX 1 se tomaron en cuenta los puntos anteriores, por lo cual se usaron extensivamente componentes de montaje superficial los cuales son más pequeños y ligeros que dispositivos convencionales; además se diseñaron circuitos impresos multicapa con componentes ensamblados en ambas caras de las tarjetas.

De esta forma los circuitos impresos desarrollados constituyen tarjetas multicapa las cuales se diseñaron con la ayuda de un paquete de diseño asistido por computadora llamado "Tango" [6],[7],[8].

En este capítulo se describe el desarrollo de los circuitos impresos elaborados para esta tesis y se dan detalles tanto de su fabricación como del ensamble de los mismos.

En el siguiente capítulo se describen las pruebas de validación del telescopio, así como las pruebas que se realizarán para obtener la calibración de los sensores instalados en el microsatélite.

5.2 Características de los circuitos impresos para SATEx 1

Como se ha descrito en capítulos anteriores, la primera tarjeta que se determinó completamente en el proyecto fue la de las microcomputadoras de vuelo. Paralelamente a su desarrollo se realizó el diseño de toda la electrónica complementaria requerida para automatizar las funciones de supervisión e inteligentes asignadas al vehículo espacial. Durante este proceso y por conveniencia, se determinó construir un módulo denominado teleadquisidor el cual integraría también por conveniencia la mayor parte de los circuitos impresos requeridos. Como ya se podían conocer las dimensiones de la microcomputadora de vuelo, se decidió utilizar conectores instalados en los extremos de la tarjeta a manera de bus, de tal forma que fuese posible la incorporación de nuevas tarjetas (de acuerdo con el progreso del diseño) con tan solo insertarlas en tandem una sobre la otra.

Por esta razón todas las tarjetas del teleadquisidor son de dimensiones de 10.2 cm por 15.3 cm.

Durante el progreso del proyecto se utilizaron varios procedimientos para terminar los diversos impresos requeridos, de tal forma que en algunos casos el diseño del circuito impreso se realizó completamente a mano, en algunos casos utilizando el ruteador por software ("Tango route" [8]) y en algunos otros una combinación de diseño automático y manual. En todos estos casos se partió de los diseños electrónicos o circuitos esquemáticos realizados con el paquete "Tango Schematic" [6].

Una vez generados los circuitos esquemáticos y habiendo dividido éstos por tarjetas, se procedió a realizar estudios para encontrar la mejor ubicación de los componentes en cada impreso. Nuevamente, en esta fase de trabajo se realizaron procedimientos manuales en algunos casos, y en otros se aprovecharon las herramientas del paquete "Tango PCB" [7] para generar salidas denominadas nido de ratas, las cuales permiten visualizar a todos los componentes integrados en un impreso con sus respectivas interconexiones.

El nido de ratas permite además, en tiempo real, mover cualquiera de los componentes observando con graficación animada las variaciones entre las interconexiones de los mismos, tal como se observa en la figura 5.1

Como se puede deducir este procedimiento es muy útil para elegir la ubicación más conveniente de cada componente, de tal forma que se elijan aquellas ubicaciones que produzcan el menor cruce de líneas entre componentes. Una vez establecidas las ubicaciones de los componentes, se procedió a realizar el trazo de líneas o interconexiones del circuito impreso.

Debido a la alta integración de componentes por tarjeta y de acuerdo a la restricción del área, resultó prácticamente imposible realizar los diseños en dos capas. Por esta razón se optó por utilizar una capa intermedia para realizar las interconexiones complementarias del diseño.

Debido a que la mayor parte de la electrónica del telediquisor es de tipo analógico se optó por no incluir capas intermedias de polarización y tierra para reducir el costo de manufactura de las tarjetas. Tampoco se consideraron efectos de tipo cross-talk, los cuales son característicos en circuitos digitales, principalmente los de alta frecuencia.

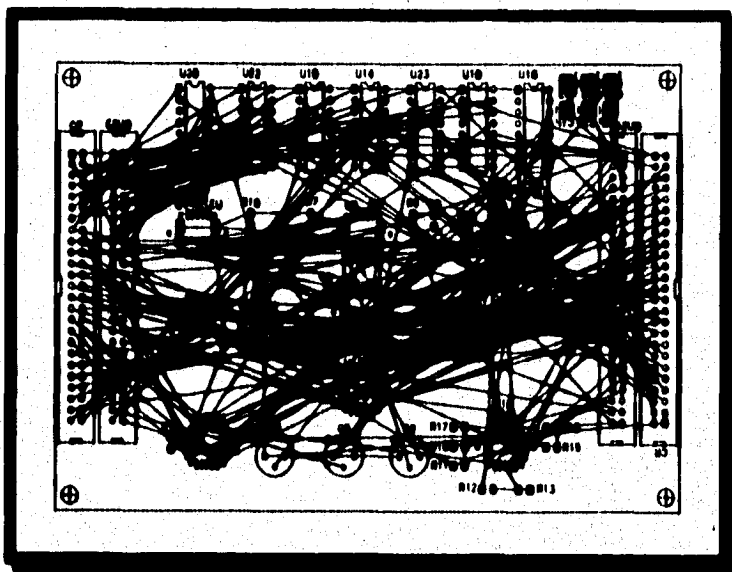


Figura 6.1 Nido de ratas de la tarjeta de control.

En las siguientes secciones se describen los detalles de fabricación de los impresos elaborados en la presente tesis.

6.3 Tarjeta de control

Como se ha mencionado en otras secciones, dentro del telediquisor se han instalado dos microcomputadoras cada una con microcontrolador, memoria RAM, EPROM, puertos serie, líneas IO, convertidor A/D, y otros periféricos más. Los objetivos que se persiguen son por un lado la capacidad de sustituir la computadora principal por la redundante en caso de que la

computadora principal experimente algún tipo de falla, sea está temporal o permanente. Por otro lado, cuando las dos microcomputadoras estén completamente operativas se trabajará un algoritmo de estabilización utilizando para ello la máxima capacidad de procesamiento de las dos microcomputadoras, es decir se realizará multiprocesamiento, en tanto que el intercambio de información o parámetros se efectuará por medio de la red interna del satélite que une a todos los dispositivos inteligentes del SATEX 1 [3].

Como se puede desprender, se requiere de una arquitectura con características muy especiales de tal forma que por medio de comandos transmitidos desde tierra, o bien por algún tipo de señal proveniente de alguno de los nodos de la red interna del satélite se pueda conmutar rápidamente de una computadora a otra. Debe destacarse que entre las líneas por conmutar se encontrarían todos los sensores del microsátélite así como las líneas de control de actuadores. Específicamente se requieren conmutar todas las señales que se indican en la tabla 5.1.

Sensores	Sensores
Sensores	Sensores
Sensores	Sensores
Sensores	Sensores
Libre	Libre
On Elec. sensores	BTM X(+) (activación)
On Elec. control	BTM X(-)
On CCD	BTM Y(+)
S0 Mux. sensores	BTM Y(-)
S1 Mux. sensores	BTM Z(+)
S2 Mux. sensores	BTM Z(-)
Mux. antenas	Gradiente Grav. 1
On. VHF 1	Gradiente Grav. 2
On. VHF 2	NC
On Elec. Mag.	NC
S0 Mux. Mag.	NC
S1 Mux. Mag.	NC
Mux RX VHF	NC
On CCUO	NC
On Elec. BTM	Lib. Ariane 1
Libre	Lib. Ariane 2

Tabla 5.1 Señales que se conmutan para computadora principal o computadora redundante.

Como se observa, se conmutan líneas que intervienen en la instrumentación del satélite.

En la siguiente hoja se presenta el circuito esquemático de la tarjeta de control.

En el circuito esquemático se muestra el tipo de control requerido para realizar la conmutación de computadores. De éste destaca el uso de multiplexores analógicos y digitales así como la energización por separado de bloques de electrónica, de tal forma que aquellos componentes que requieren energía continua se encuentran polarizados por líneas independientes, en tanto que aquellos módulos susceptibles de ser conmutados se les puede aplicar o quitar la energía según se requiera durante el proceso de conmutación. A este proceso se le puede llamar reconfiguración para tolerar fallas, de este circuito esquemático también debe destacarse el elemento realizado sobre las líneas de la red interna el cual permite que al conmutar una computadora por otra, la computadora con falla quede completamente aislada para que su comportamiento no pueda afectar a la instrumentación restante y por tanto a la misión del satélite.

La electrónica descrita reside en la tarjeta de control, en la que se alojan 25 circuitos integrados, 41 componentes pasivos y 4 conectores ubicados en los extremos de la tarjeta.

En cada extremo de la tarjeta se tienen dos conectores, del lado izquierdo los conectores CP y BUS 3, en tanto que en el lado derecho se tienen los conectores denominados CR y BUS4. Los conectores CP y CR forman parte del submódulo de conmutación de computadores de tal forma que por medio de ellos se permite la conexión o desconexión (de la instrumentación del SATEX 1) de cualquiera de ellos.

Los conectores BUS 3 y BUS 4 se utilizan a manera de bus para conectar periféricos del satélite con las microcomputadoras. Parte de estos periféricos constituyen el multiplexaje de señales de sensores, el control de líneas IO, así como todas las etapas de recorte, filtrado y acondicionamiento de señales. Algunos de estos periféricos se encuentran dentro del teleadquisidor y otros se ubican en la parte exterior, como se describió en la sección 2.3. En las figuras 5.2a y 5.2b se muestran las señales que componen a los conectores citados.

El circuito impreso de la tarjeta de control se efectuó realizando técnicas automatizadas de ruteo, así como técnicas de trazado manual de líneas.

Partiendo del circuito esquemático de la tarjeta de control, se procedió a ubicar cada componente en la tarjeta para buscar la mejor posición que

reduciera la complejidad de la interconexión de señales. Para esto se utilizó la salida nido de ratas que ofrece "Tange PCB" y se llegó a la conclusión de que uno de los mejores arreglos sería el que se eligió, en el cual se colocaron componentes en espejo dentro de la tarjeta, esto es por un lado se instalaron algunos circuitos integrados de montaje superficial y por el otro lado se colocaron en espejo circuitos integrados similares. La tarjeta se diseñó en tres capas, esta es, capas superior, intermedia e inferior. Además para aquellas capas en que se montan componentes se deben generar mascareras de antelación y de referencias.

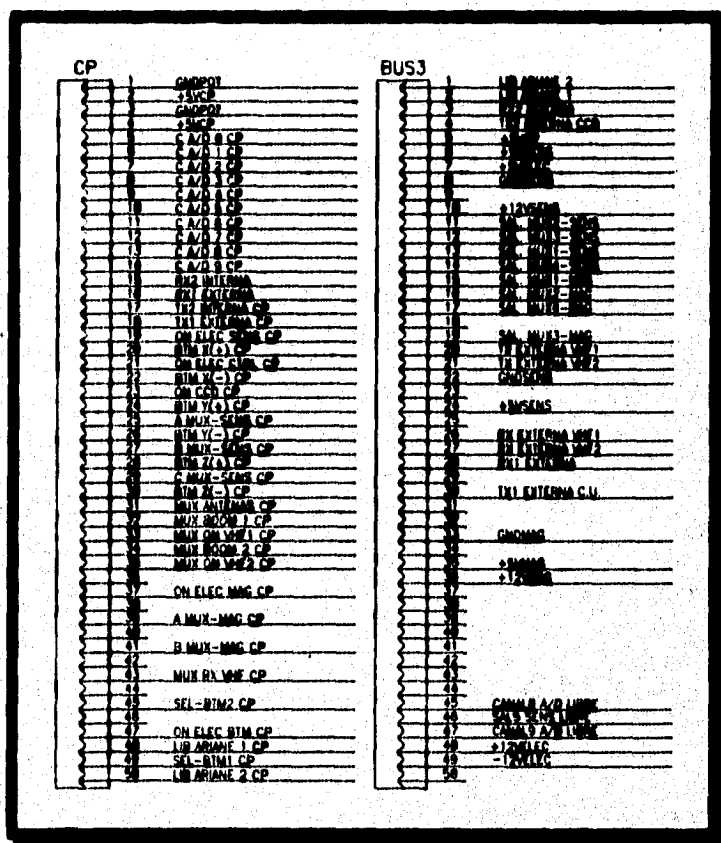


Fig. 5.2a Conectores laterales (izquierdos) de la tarjeta de control.

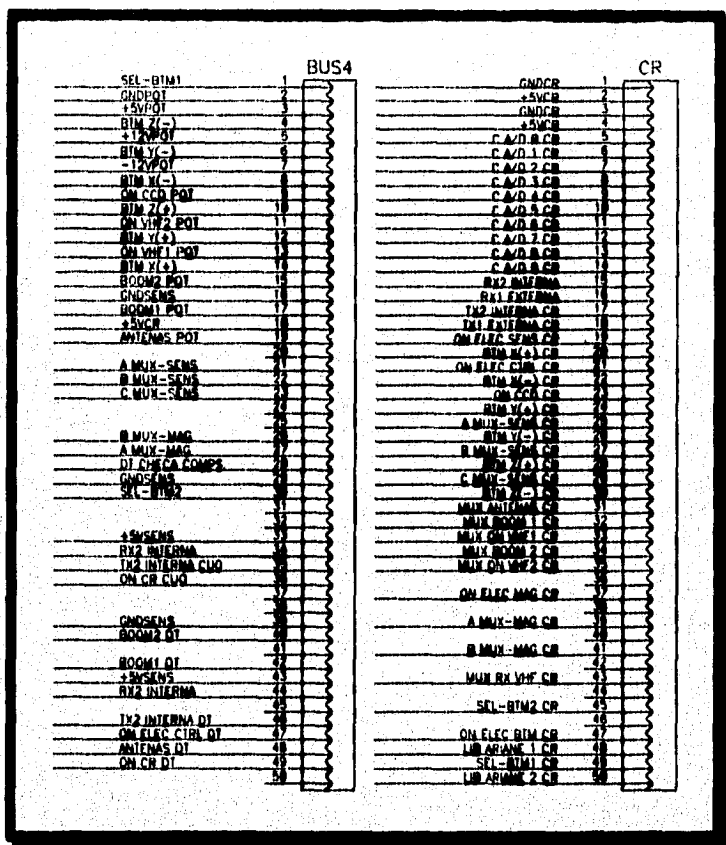
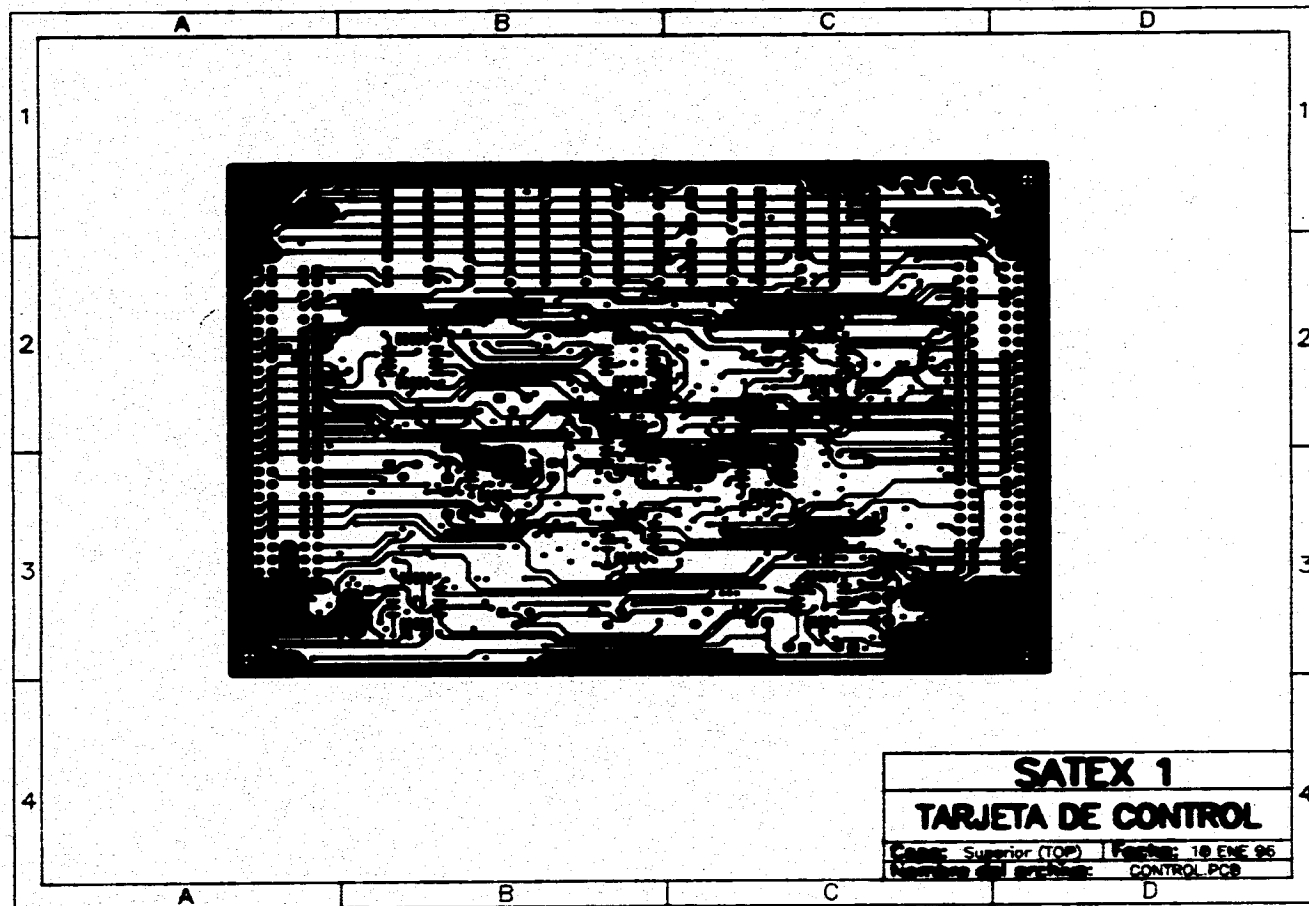


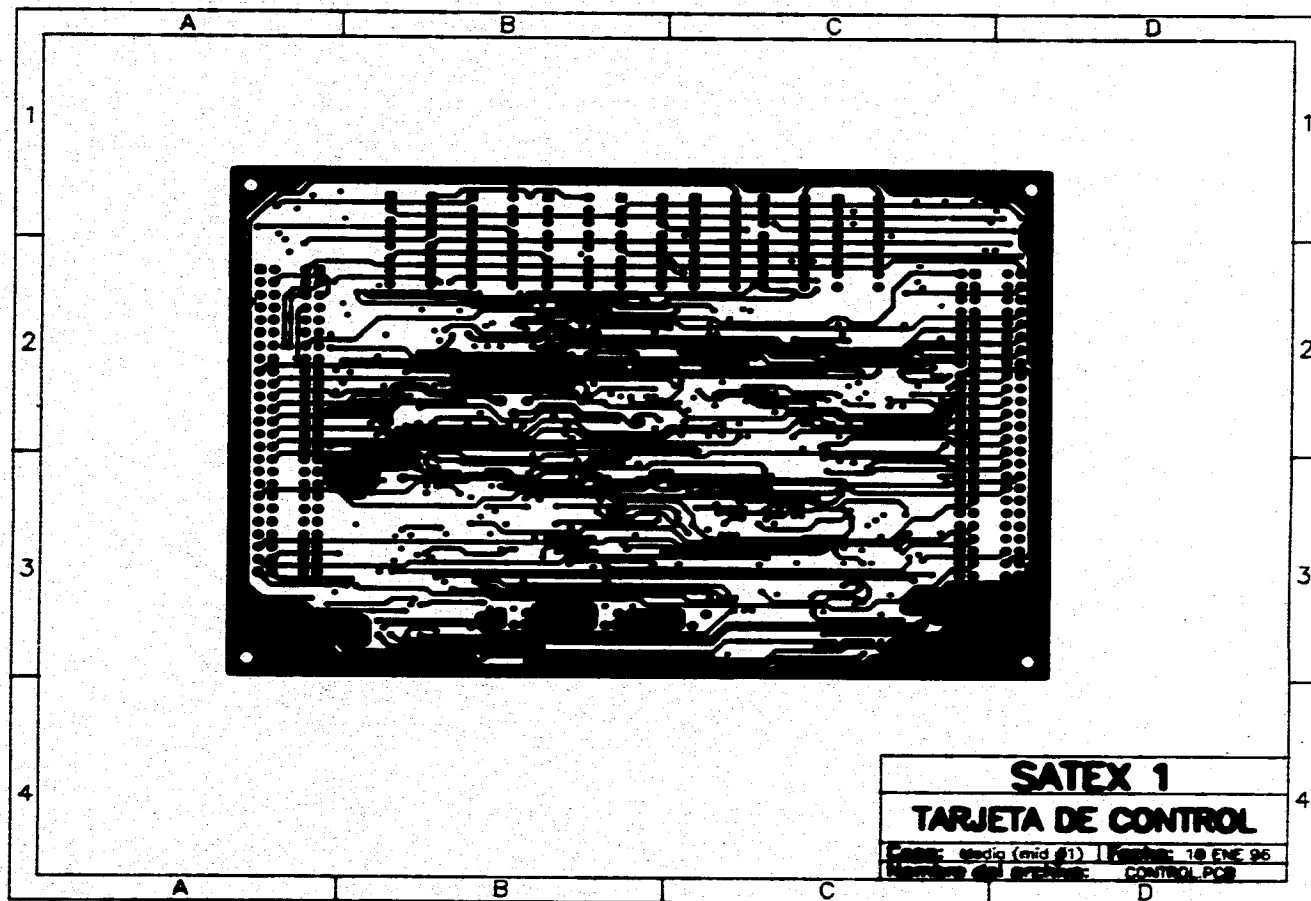
Fig. 5.2b Conectores laterales derechos de la tarjeta de control.

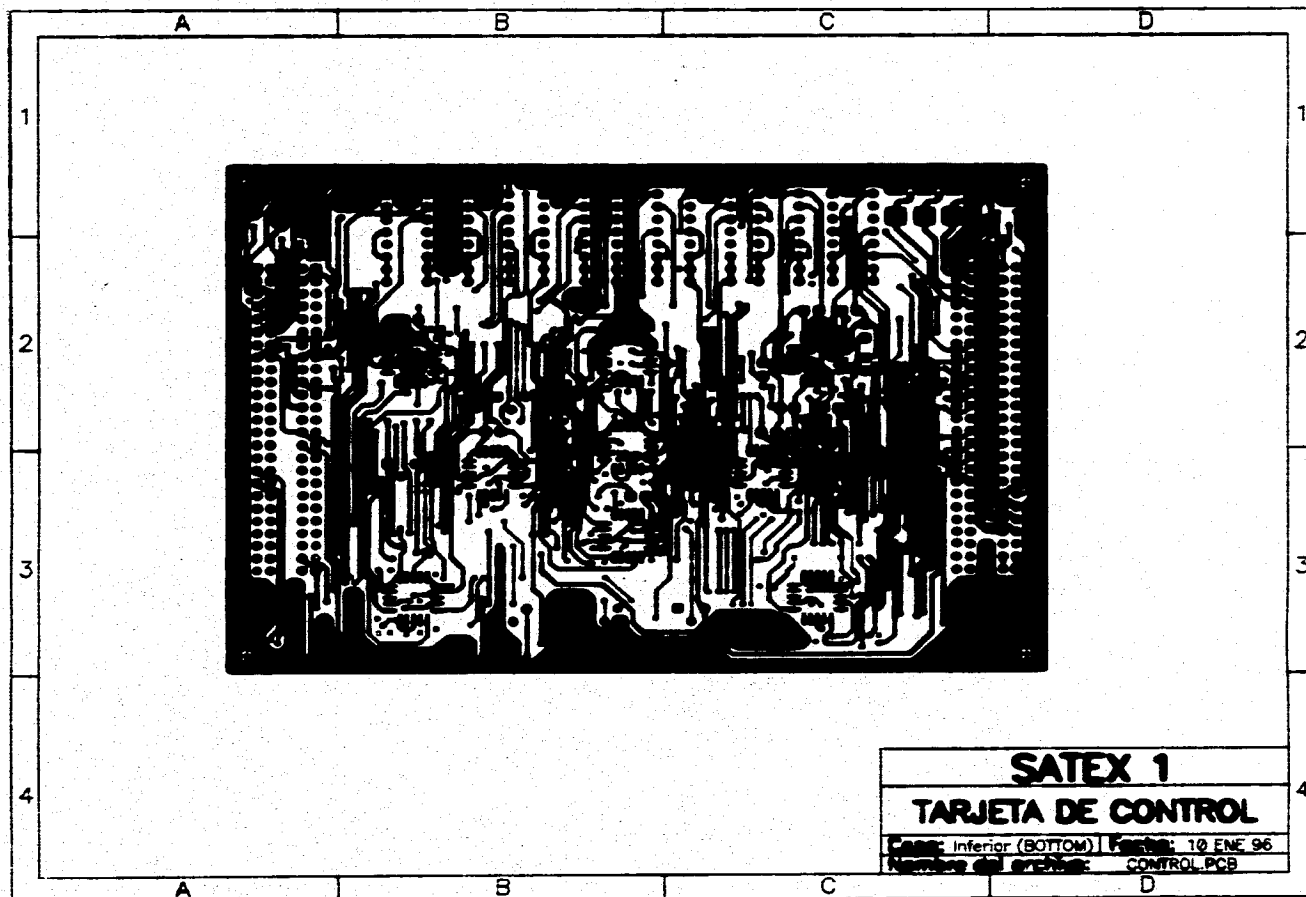
Finalmente, es necesario generar la capa de perforaciones, en la cual se indica el sitio preciso en donde se ubicaron "vias" y "thrupads" del circuito impreso. En las siguientes figuras se muestran todas las capas que se requieren generar para fabricar la tarjeta de control.

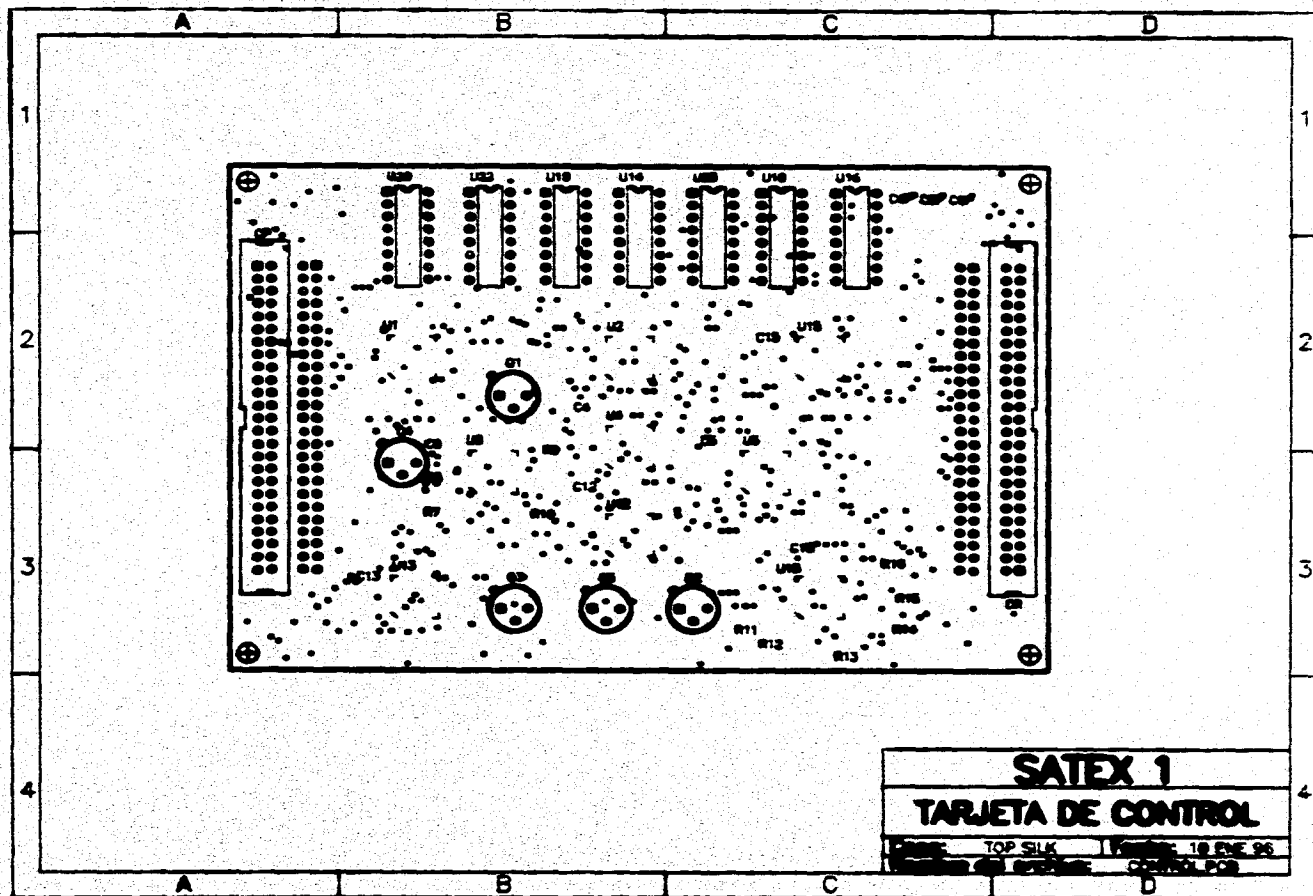
5.4 Tarjeta de la microcomputadora

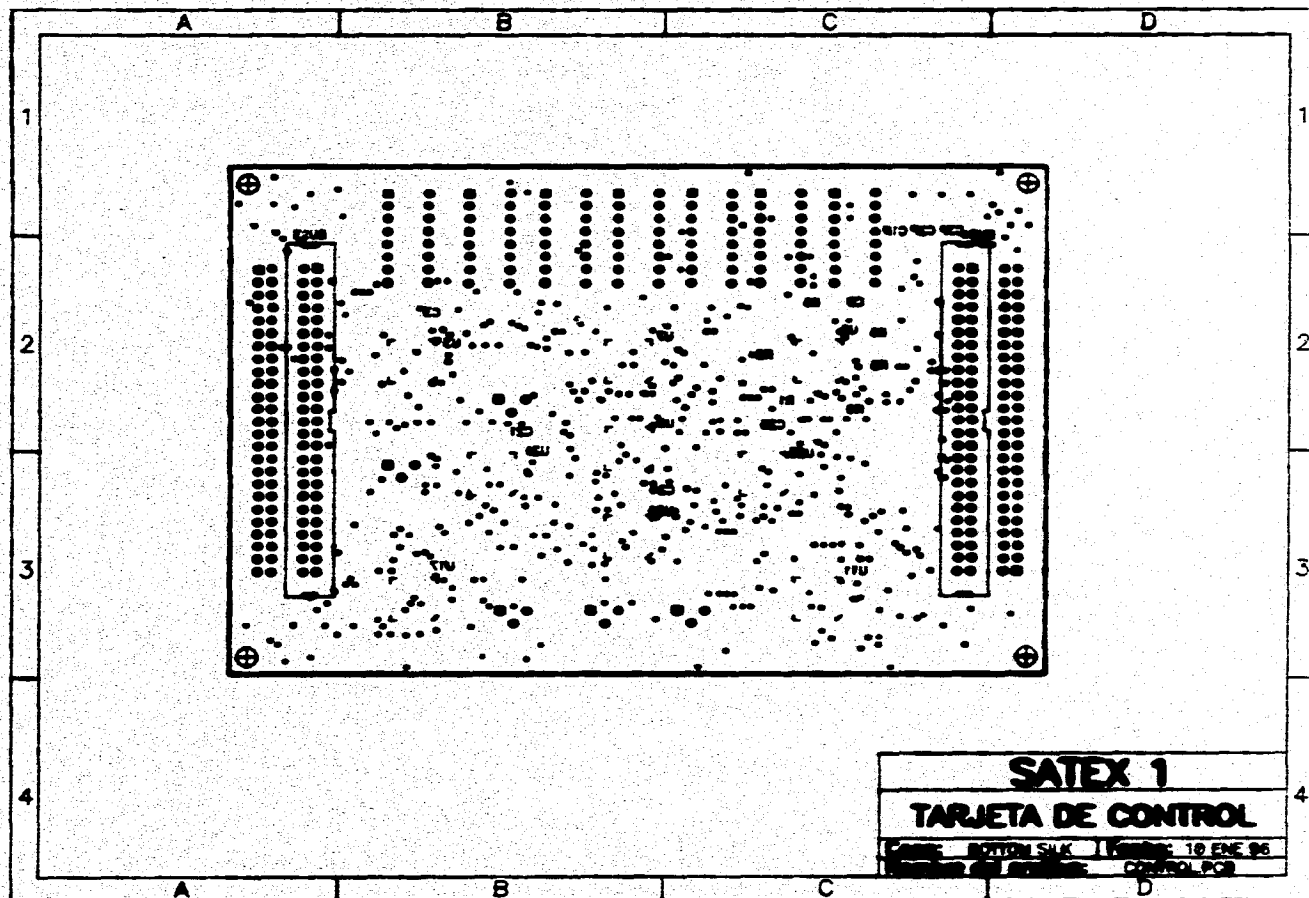
Como se explicó en capítulos previos, la computadora de SATEX 1 es una versión adaptada y modificada de un prototipo industrial que se vende comercialmente, la cual se observa en la figura 5.3.

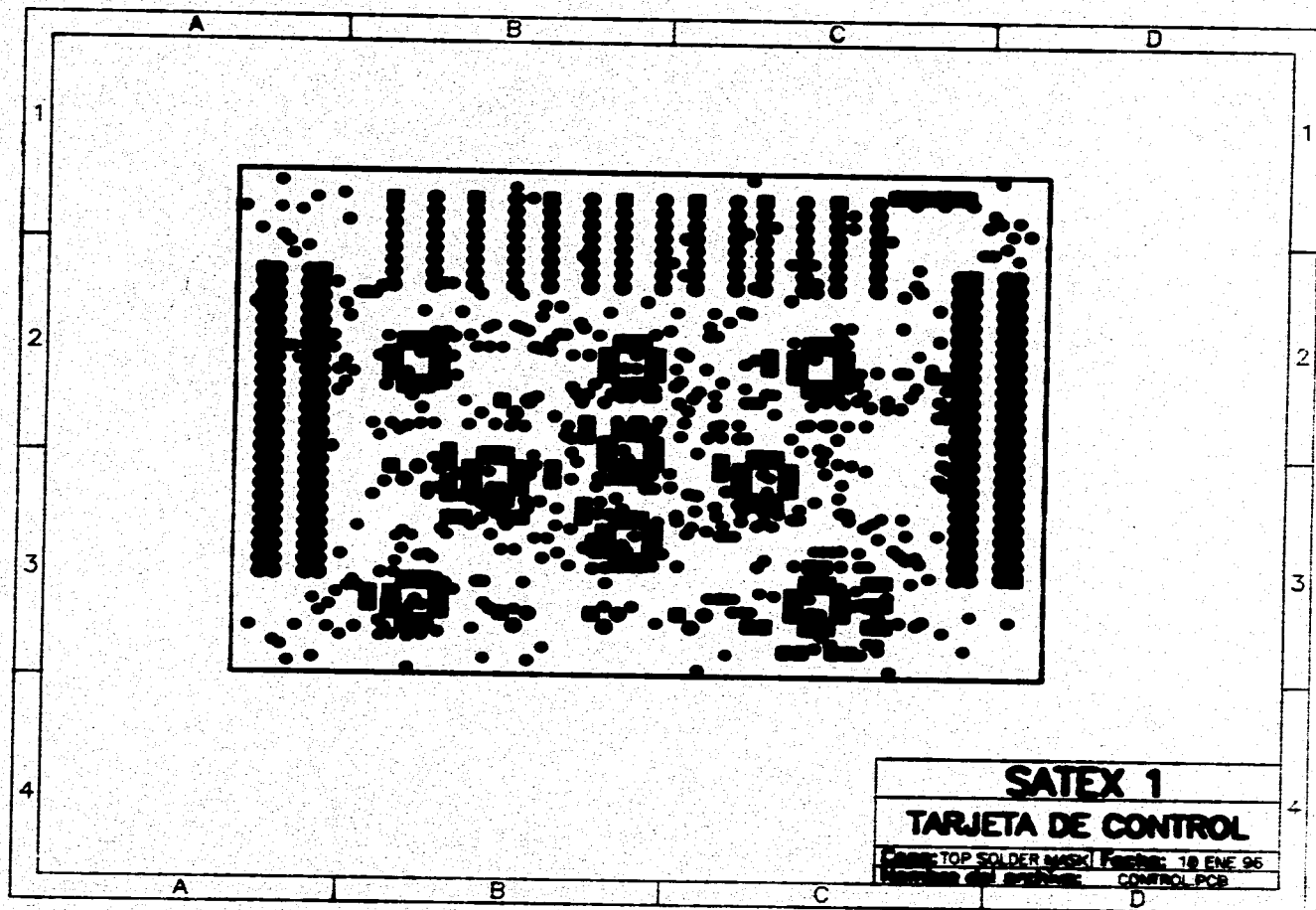


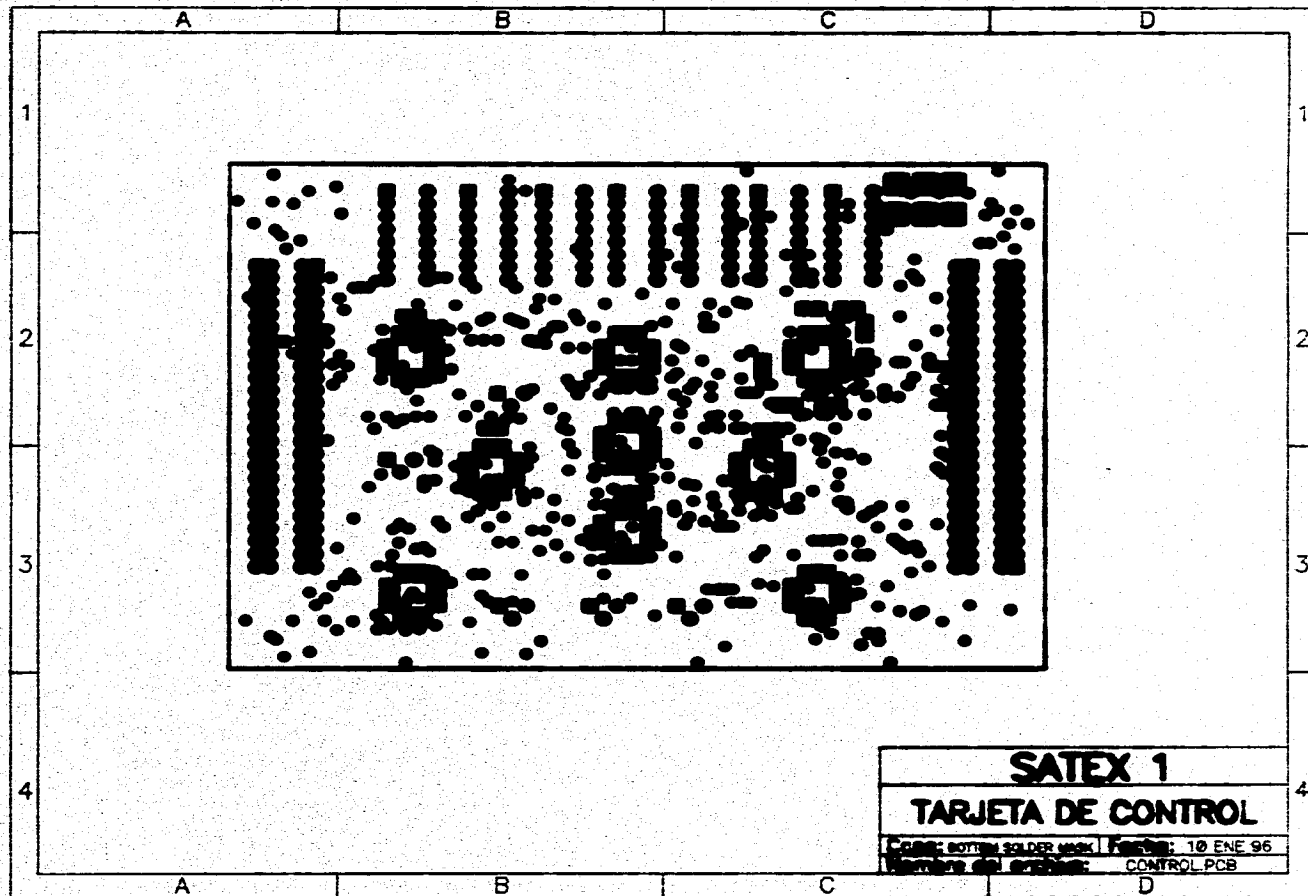


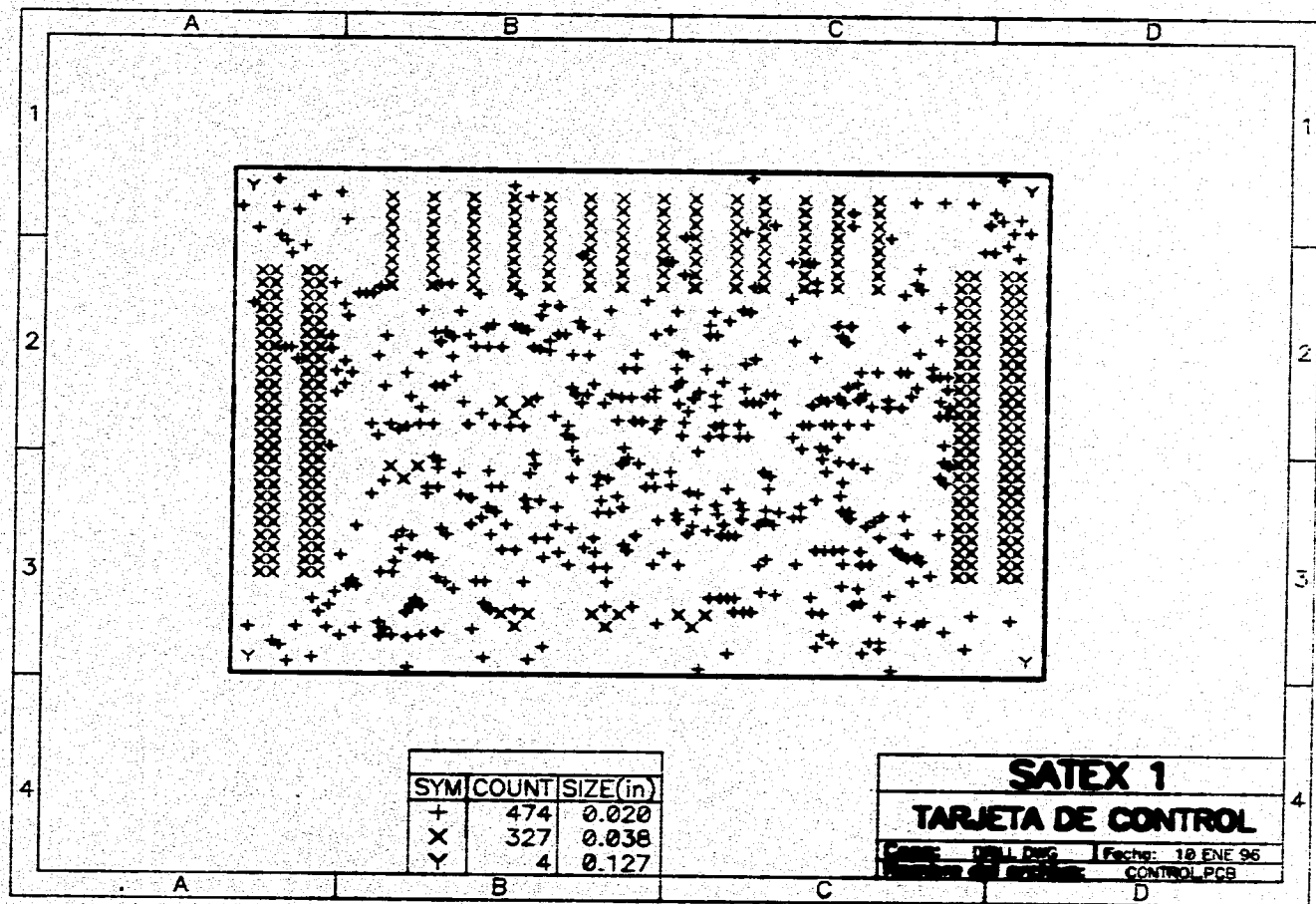












A la microcomputadora de vuelo se le quitaron algunos conectores, a otros se les cambió de posición y se instalaron circuitos integrados de tipo militar con excepción del microcontrolador al cual no fue posible obtenerlo de fabricación militar.

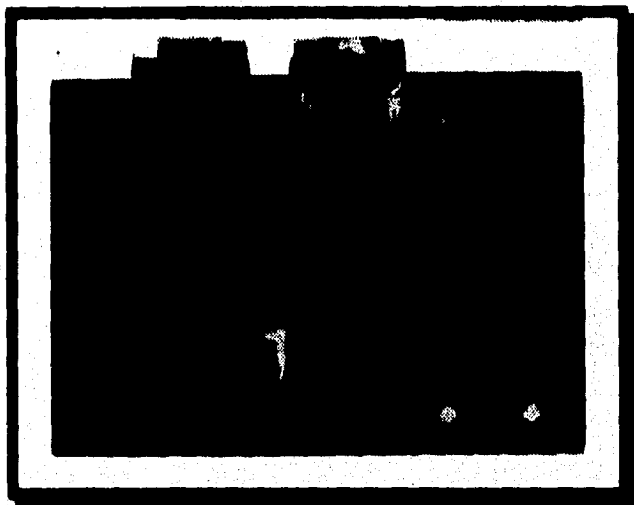


Figura 5.3 Microcomputadora comercial elegida.

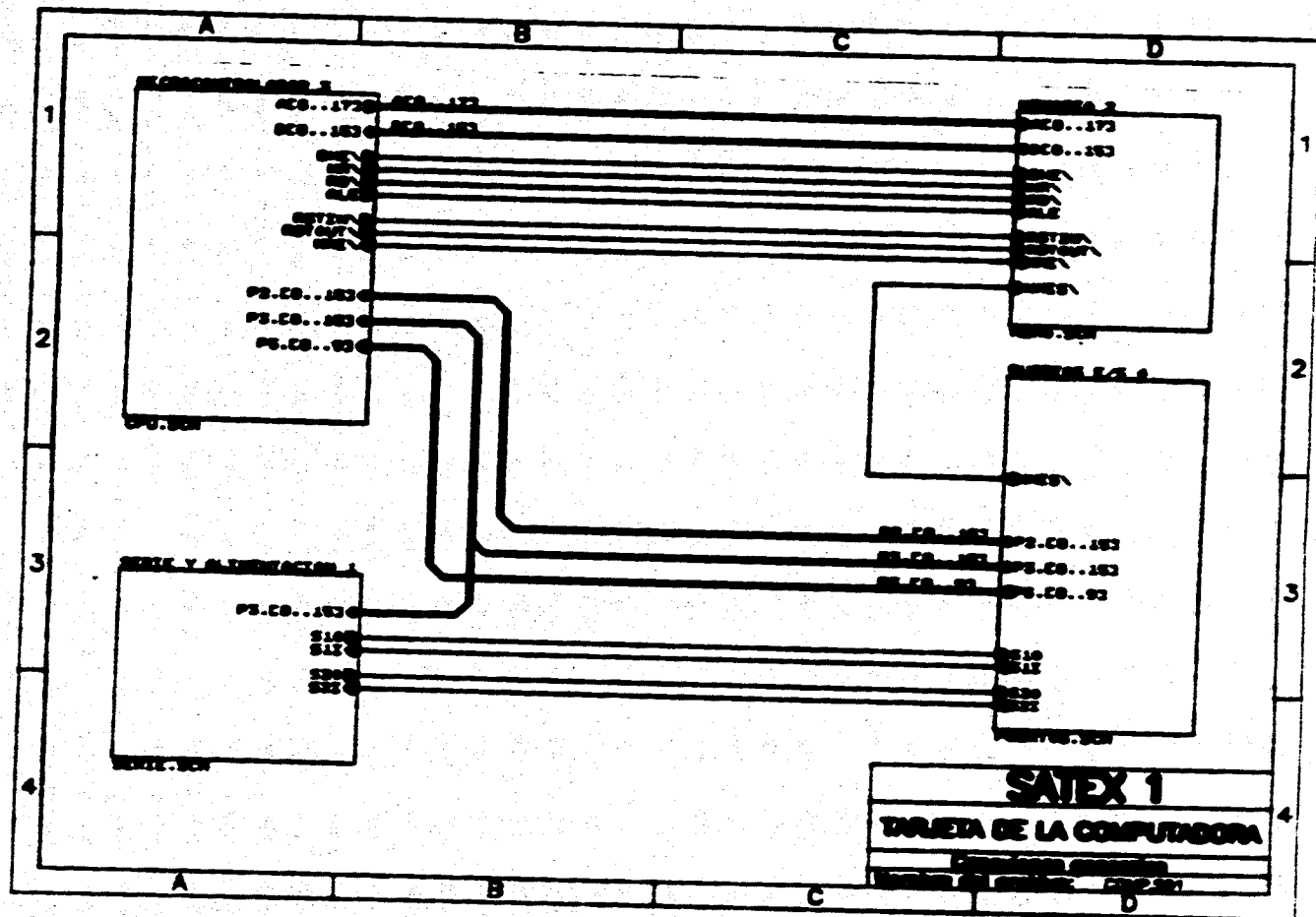
Algunos circuitos muy particulares que generan la señal de "reset" y la interrupción no mascarable fueron eliminados de la tarjeta, los circuitos esquemáticos de la computadora de vuelo se muestran en seguida.

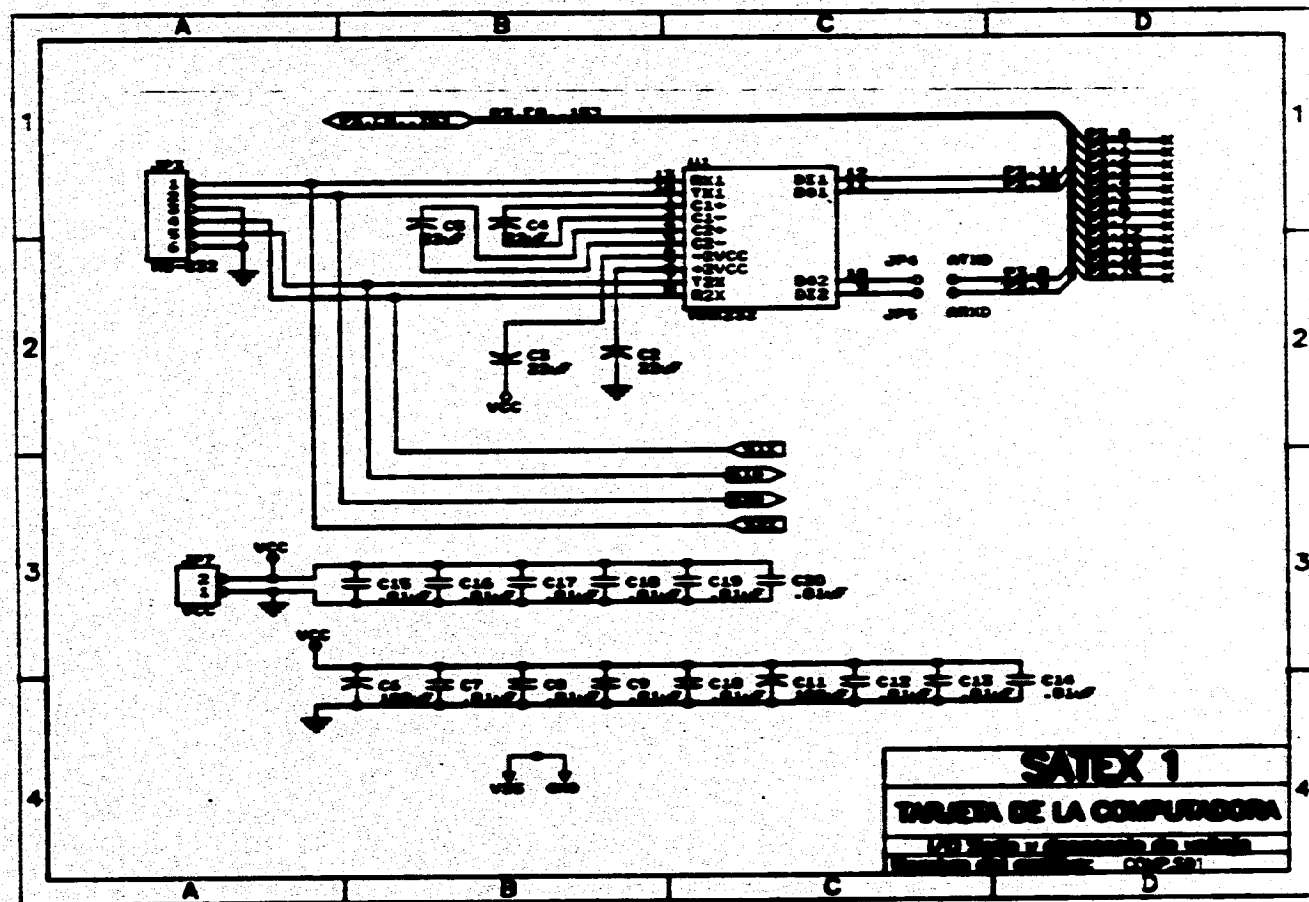
De forma similar al diseño de la tarjeta de control para la computadora de vuelo se generaron 7 capas, las cuales fueron necesarias para la fabricación de la tarjeta. Después de los esquemáticos se anexan cada una de las capas de esta tarjeta.

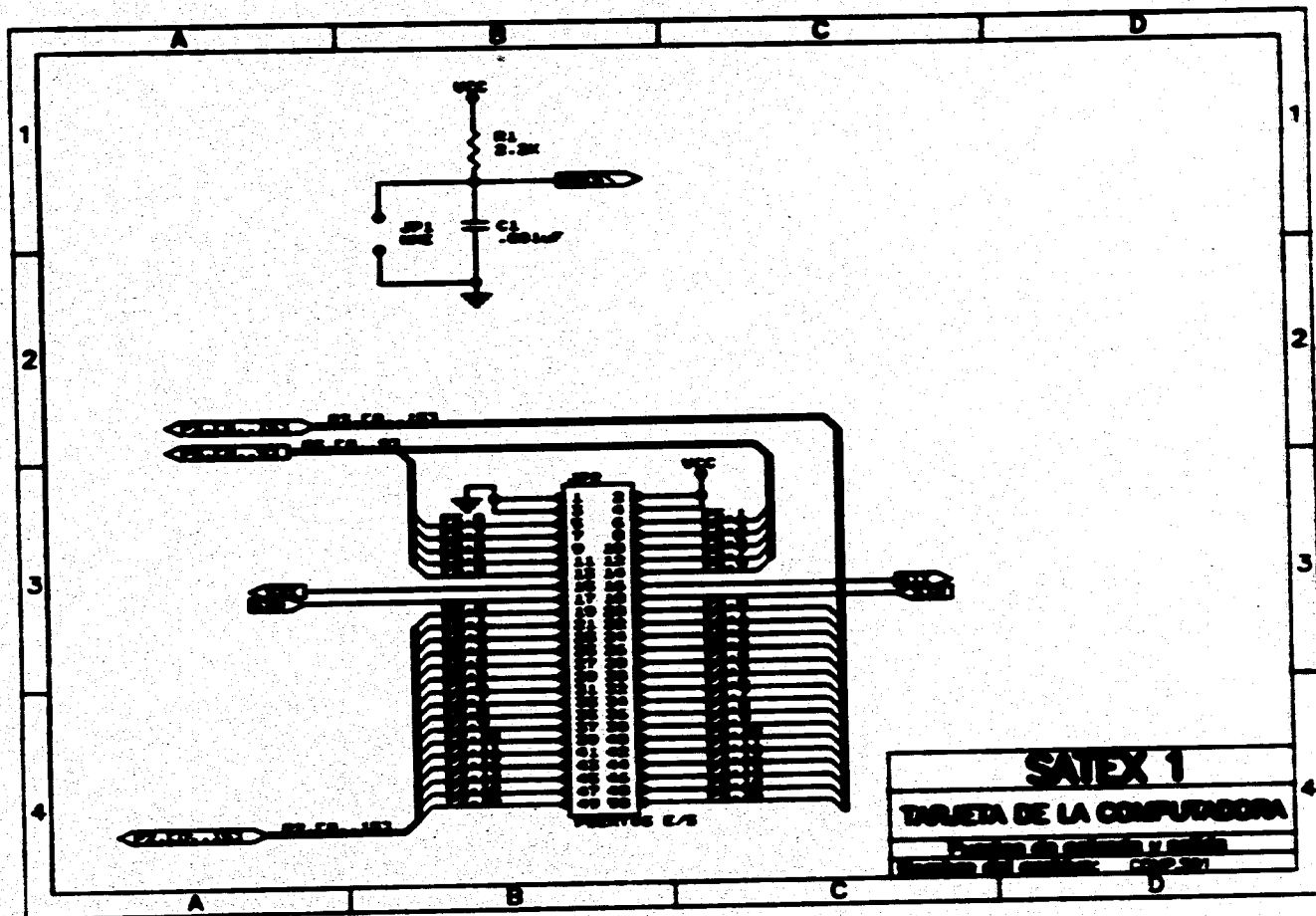
5.6 Tarjeta de sensores

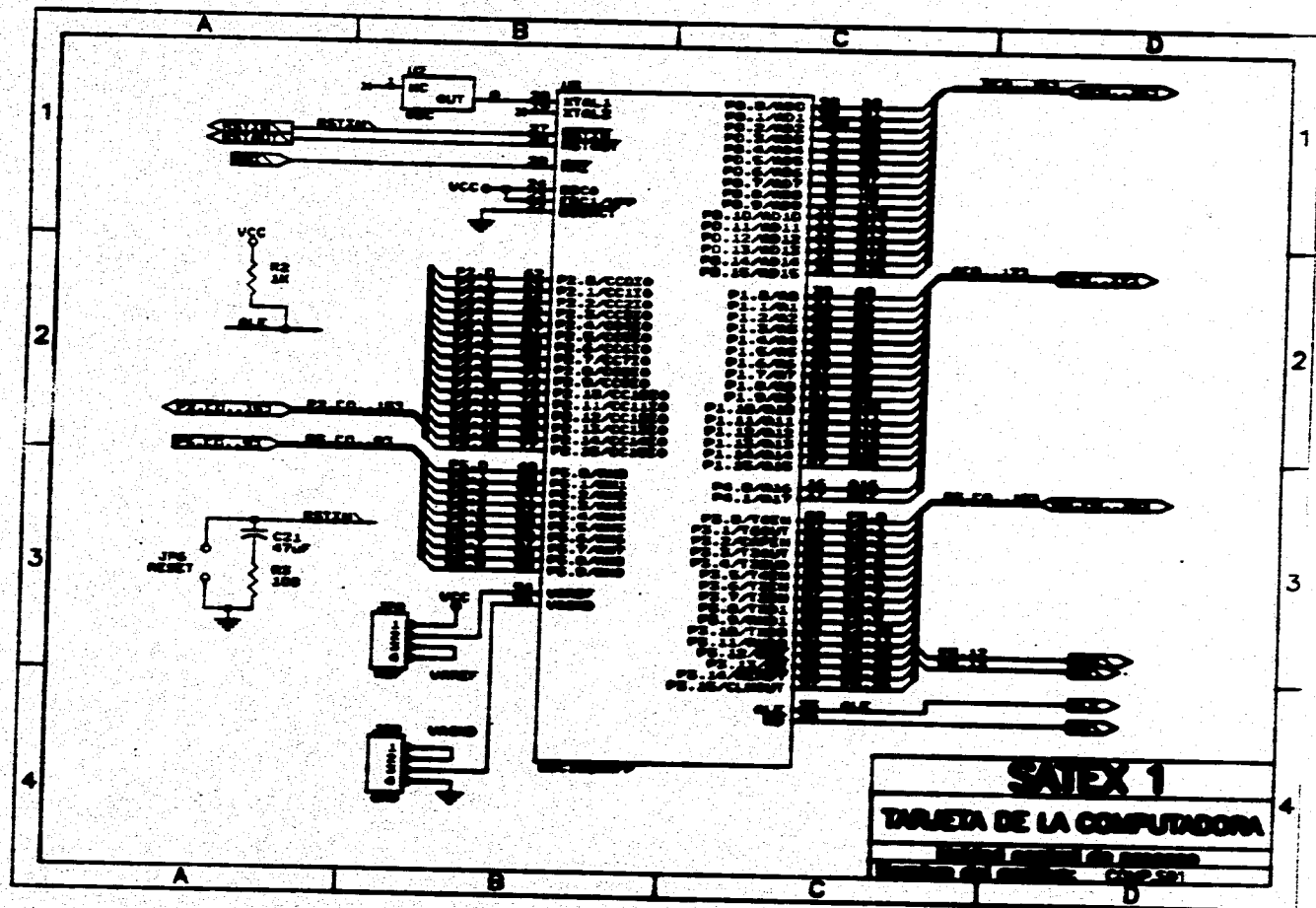
Como se mencionó en el capítulo 2, el acondicionamiento de sensores se presenta en tres formas diferentes en SATEX 1.

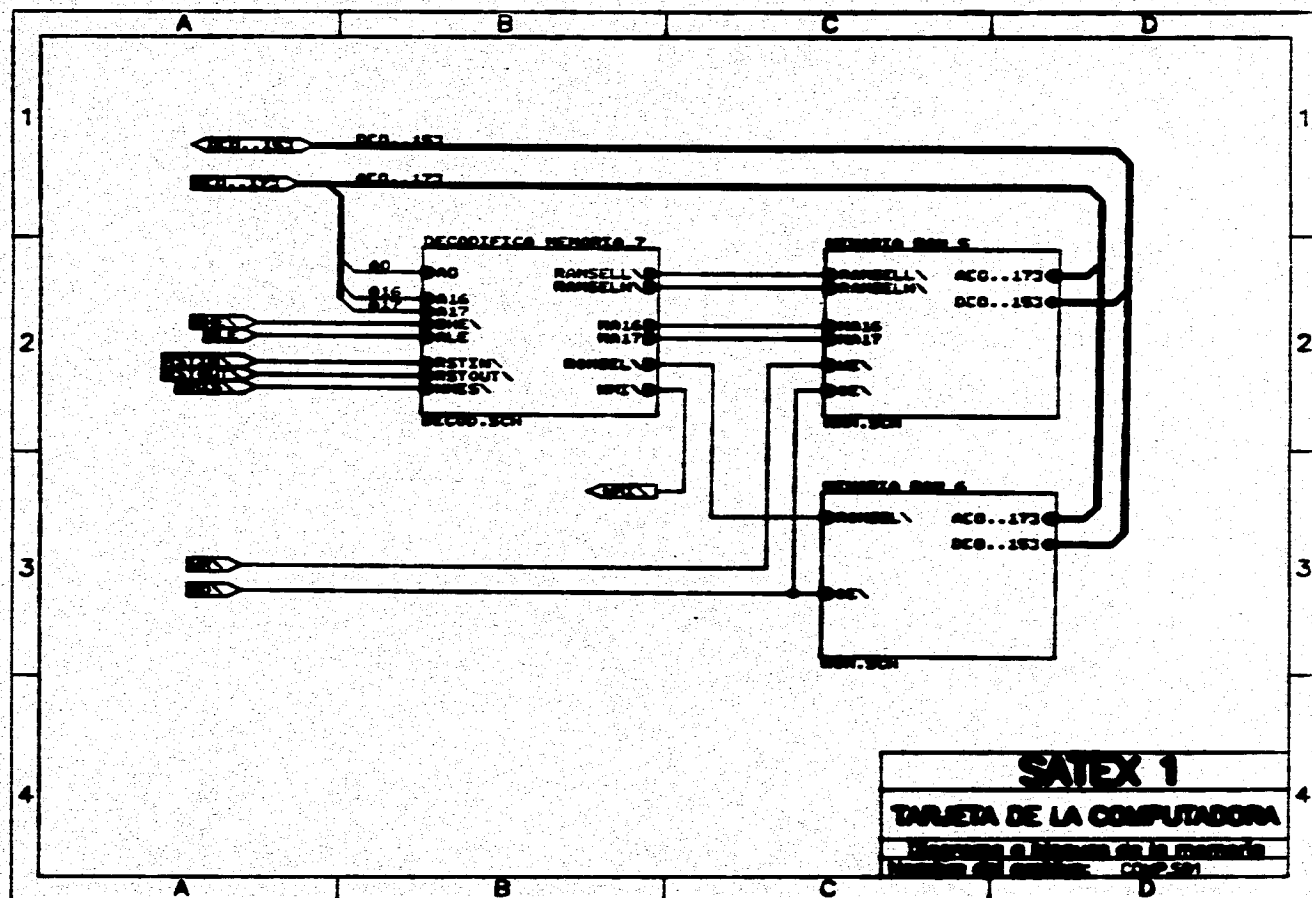
- 1) Para sensores ubicados dentro del teleadquisidor, los circuitos de acondicionamiento se ubican también en el interior.
- 2) Sensores externos con circuitos de acondicionamiento también externos.

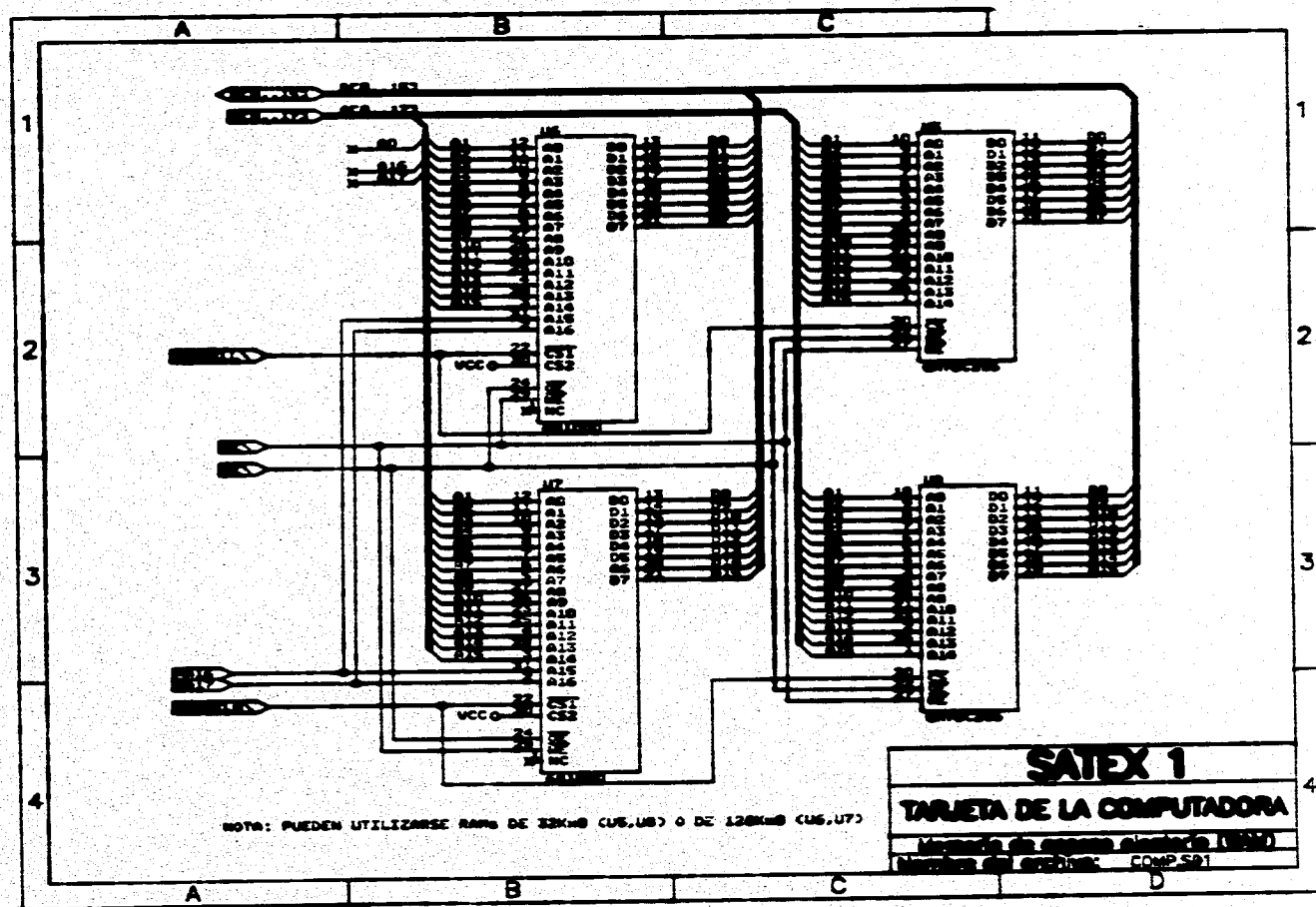




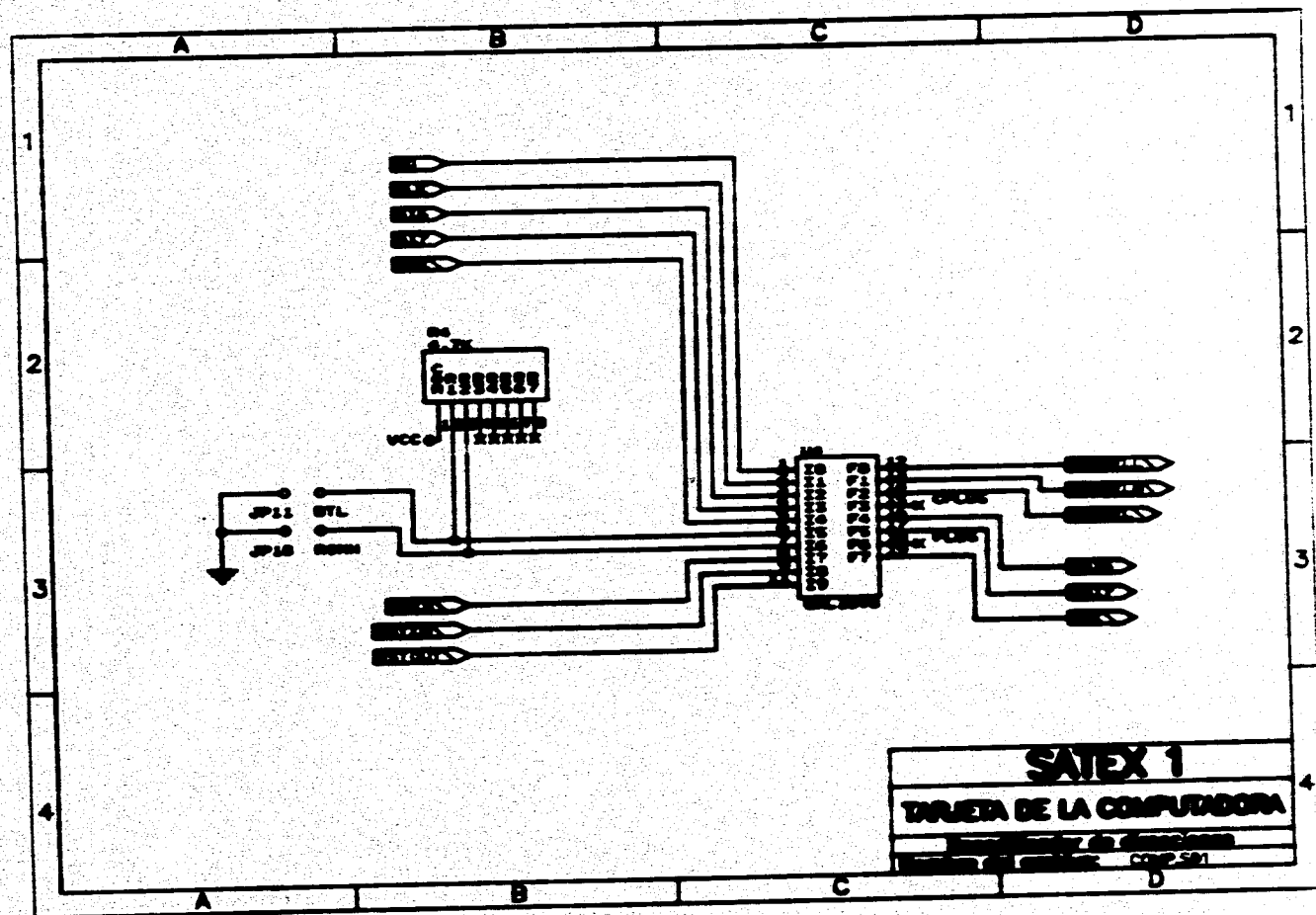


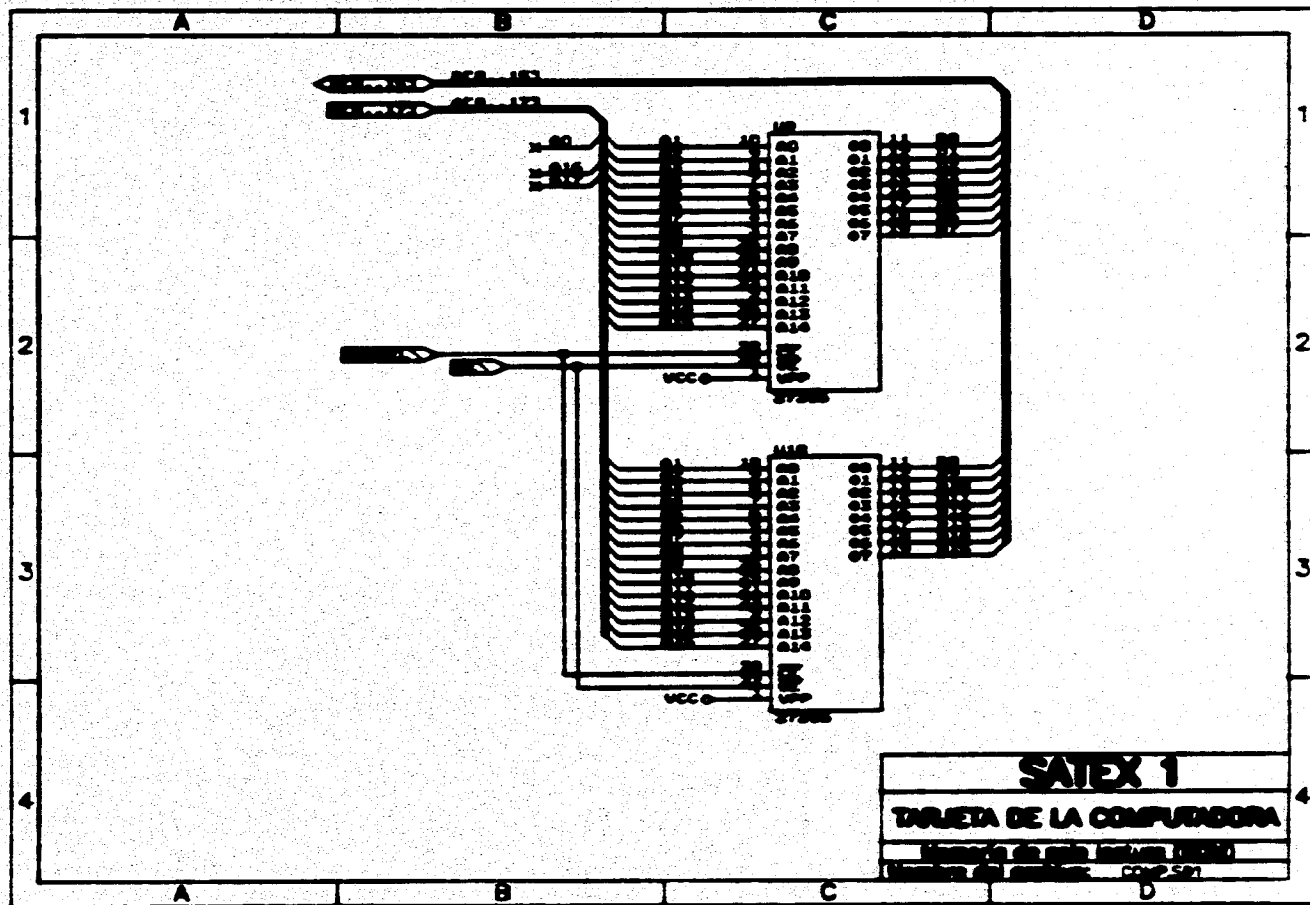


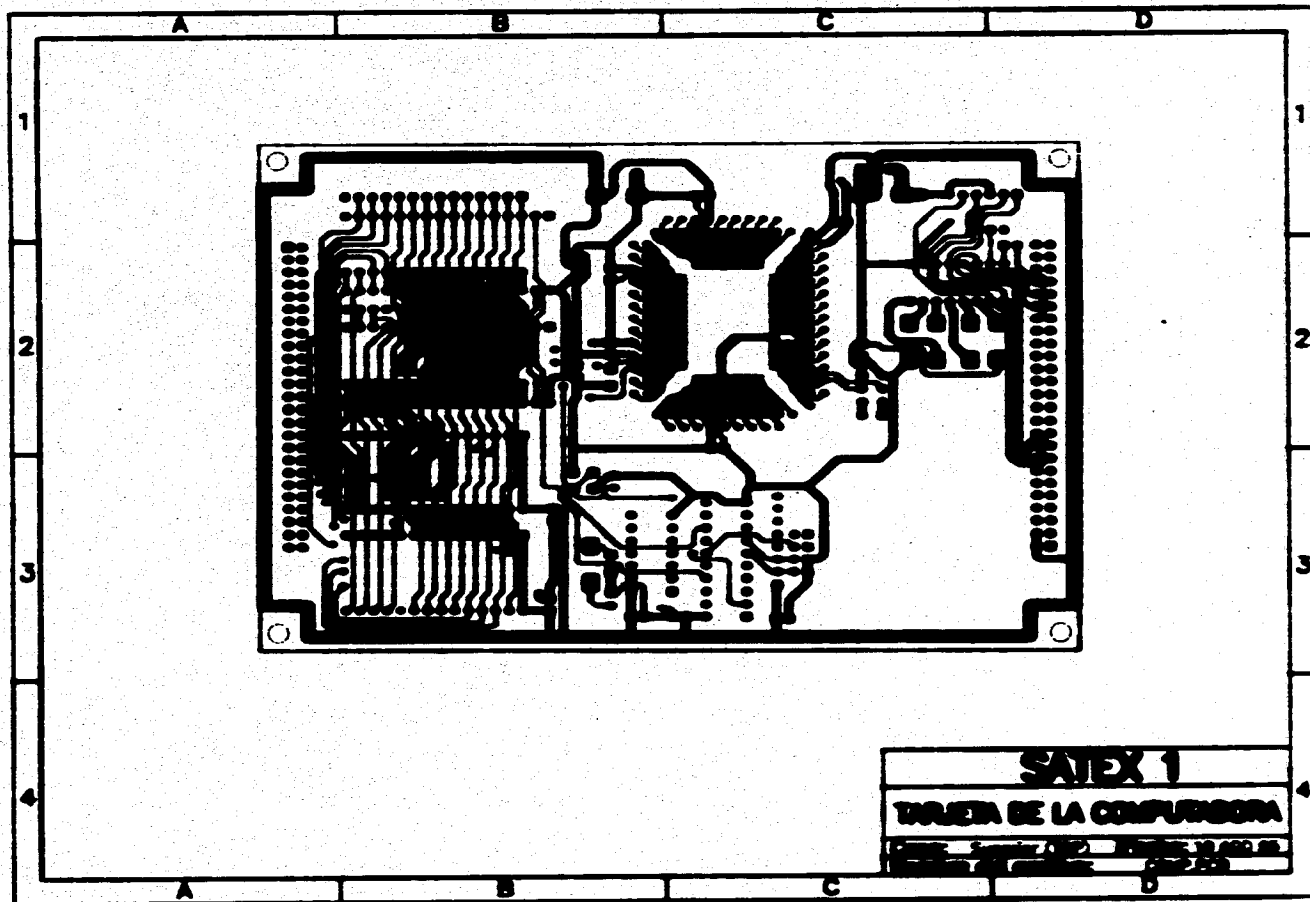


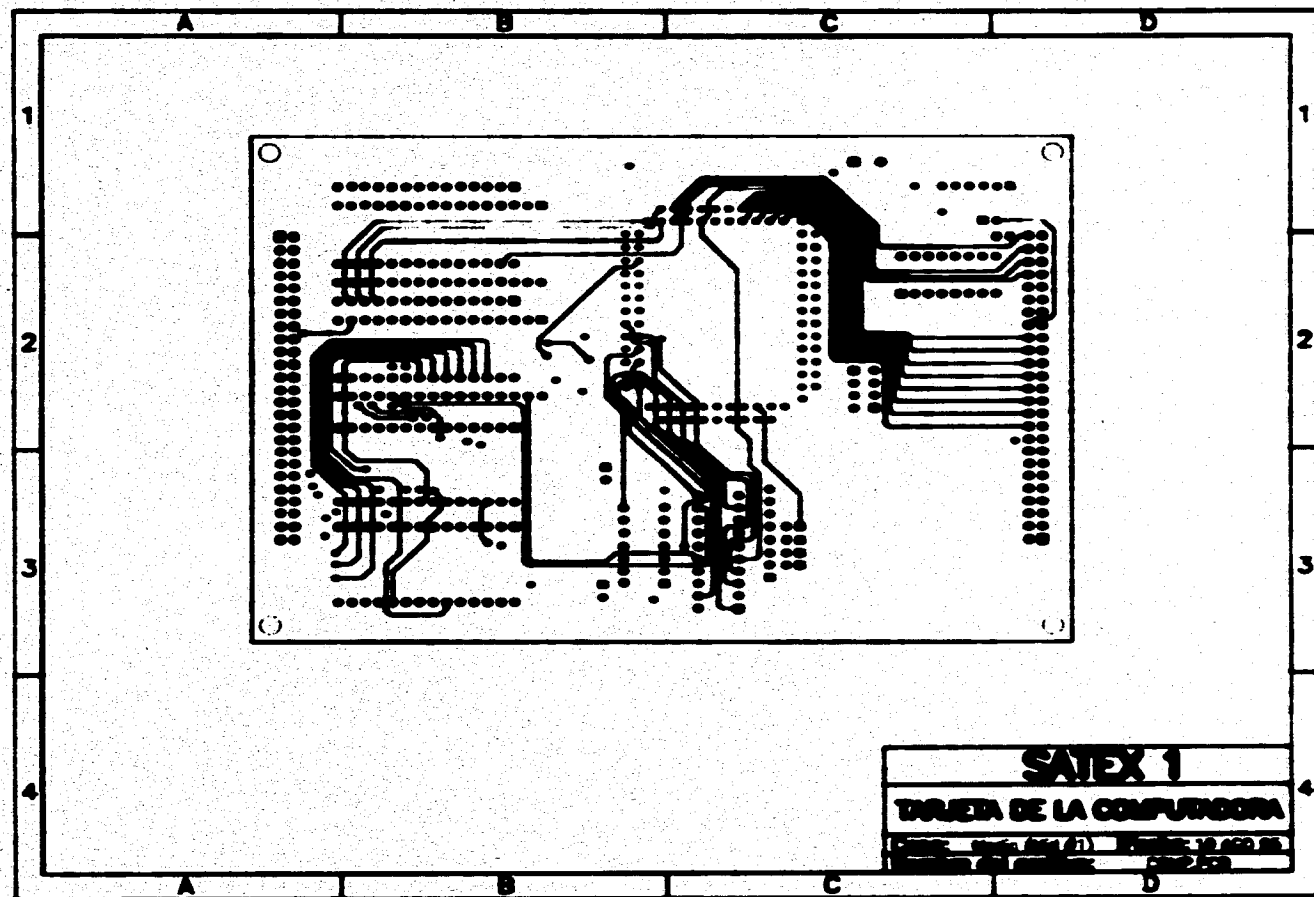


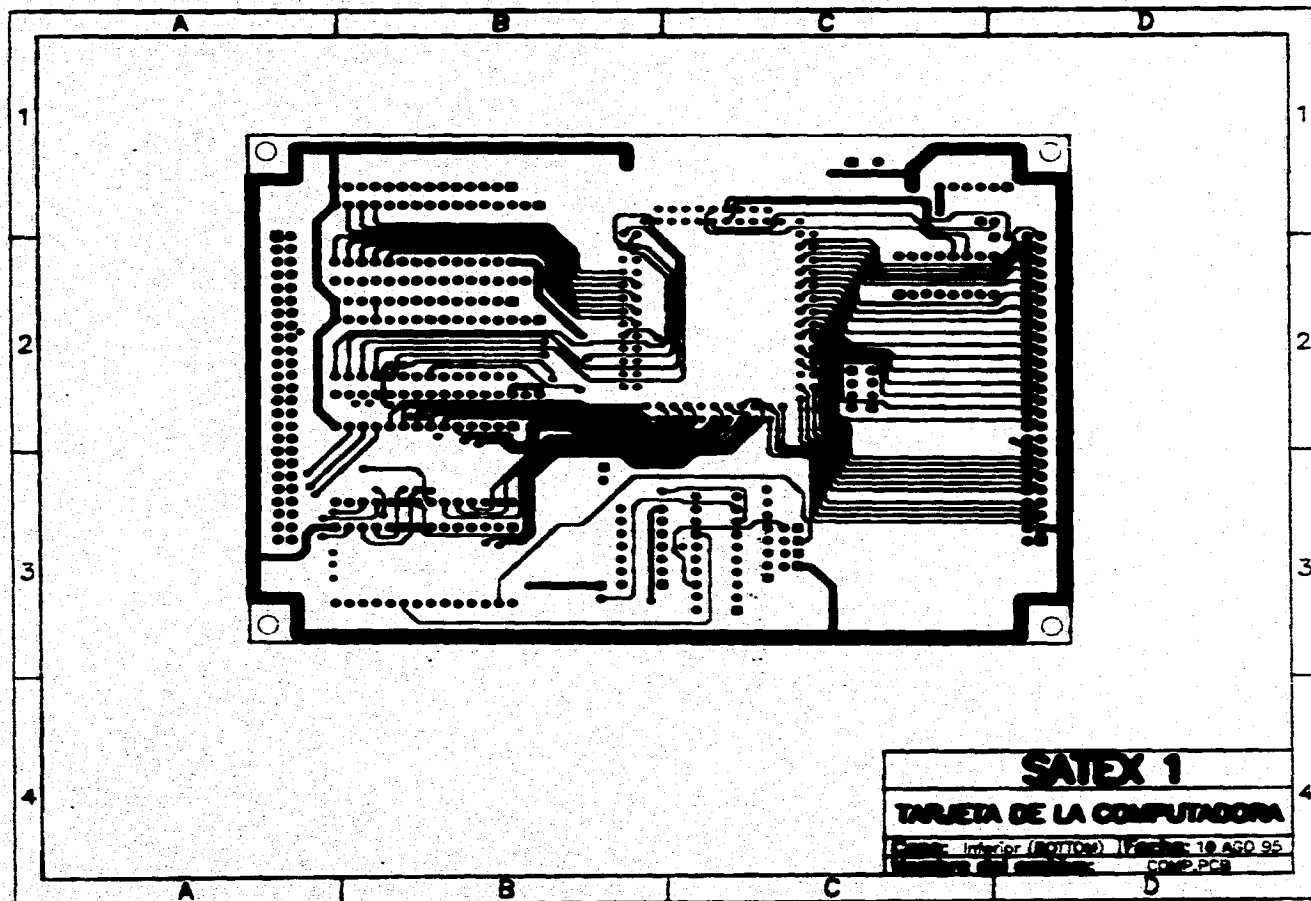
SATEX 1
TARJETA DE LA COMPUTADORA
 Memoria de acceso aleatorio (RAM)
 Memoria del sistema: COMP.521

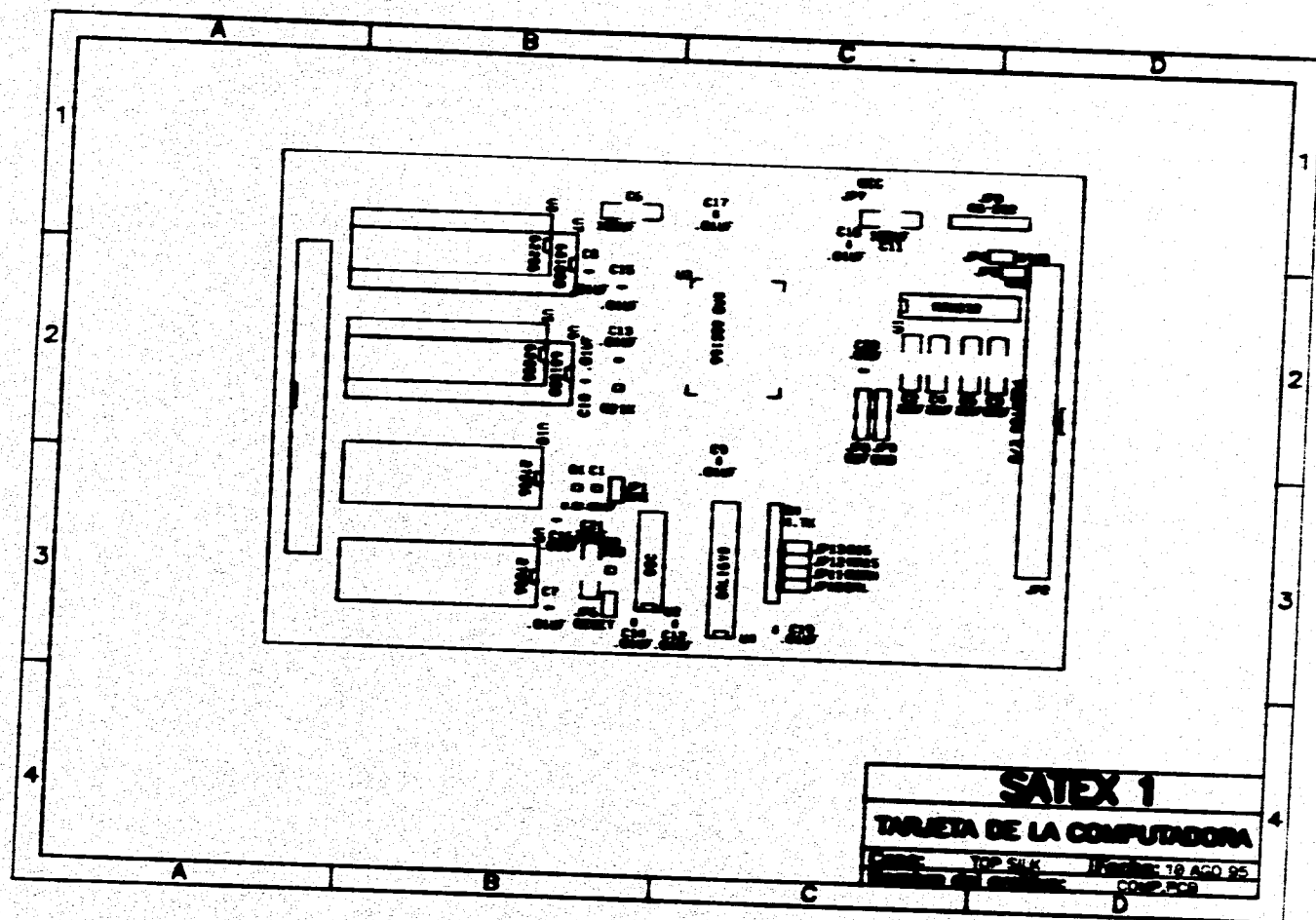


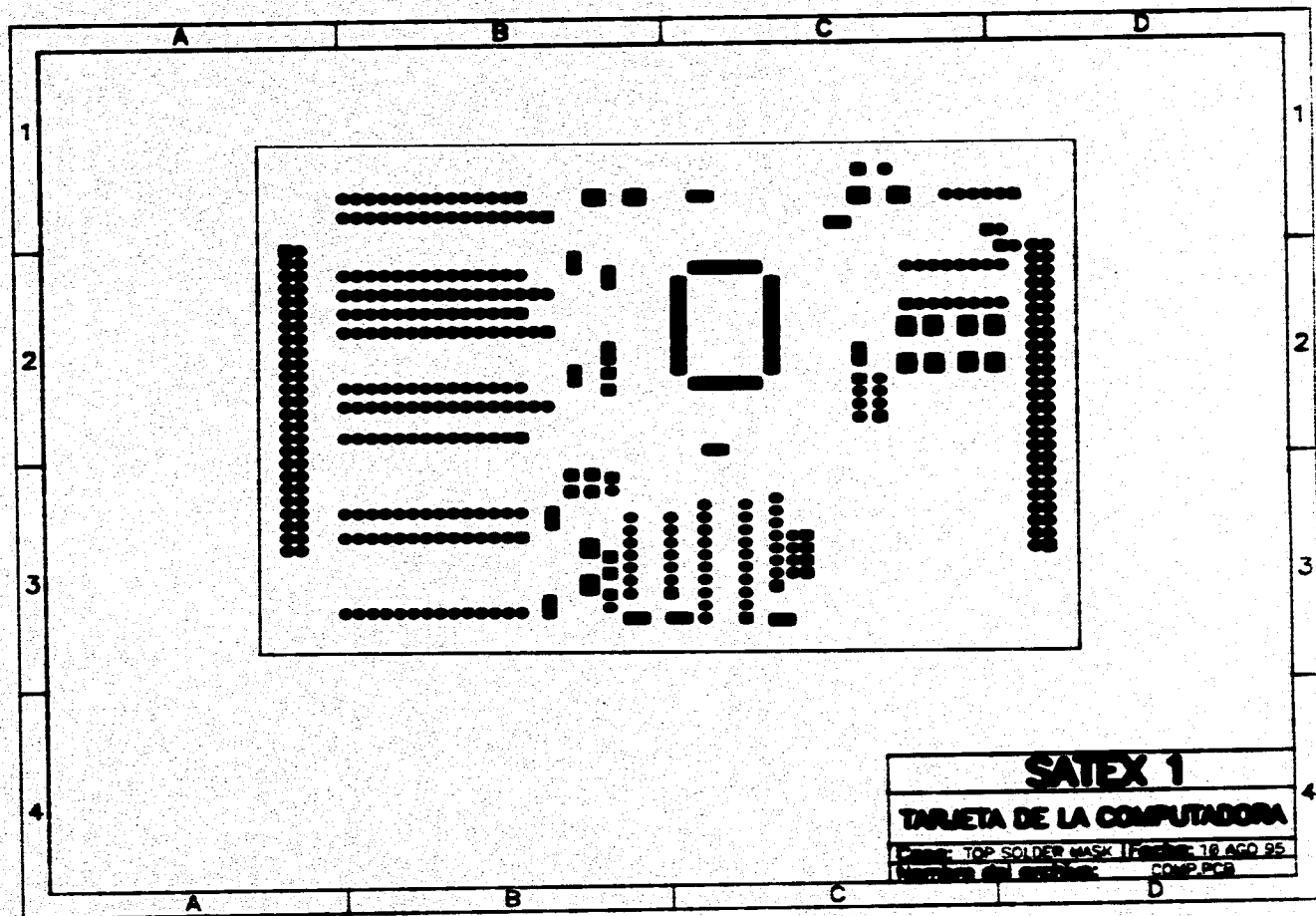


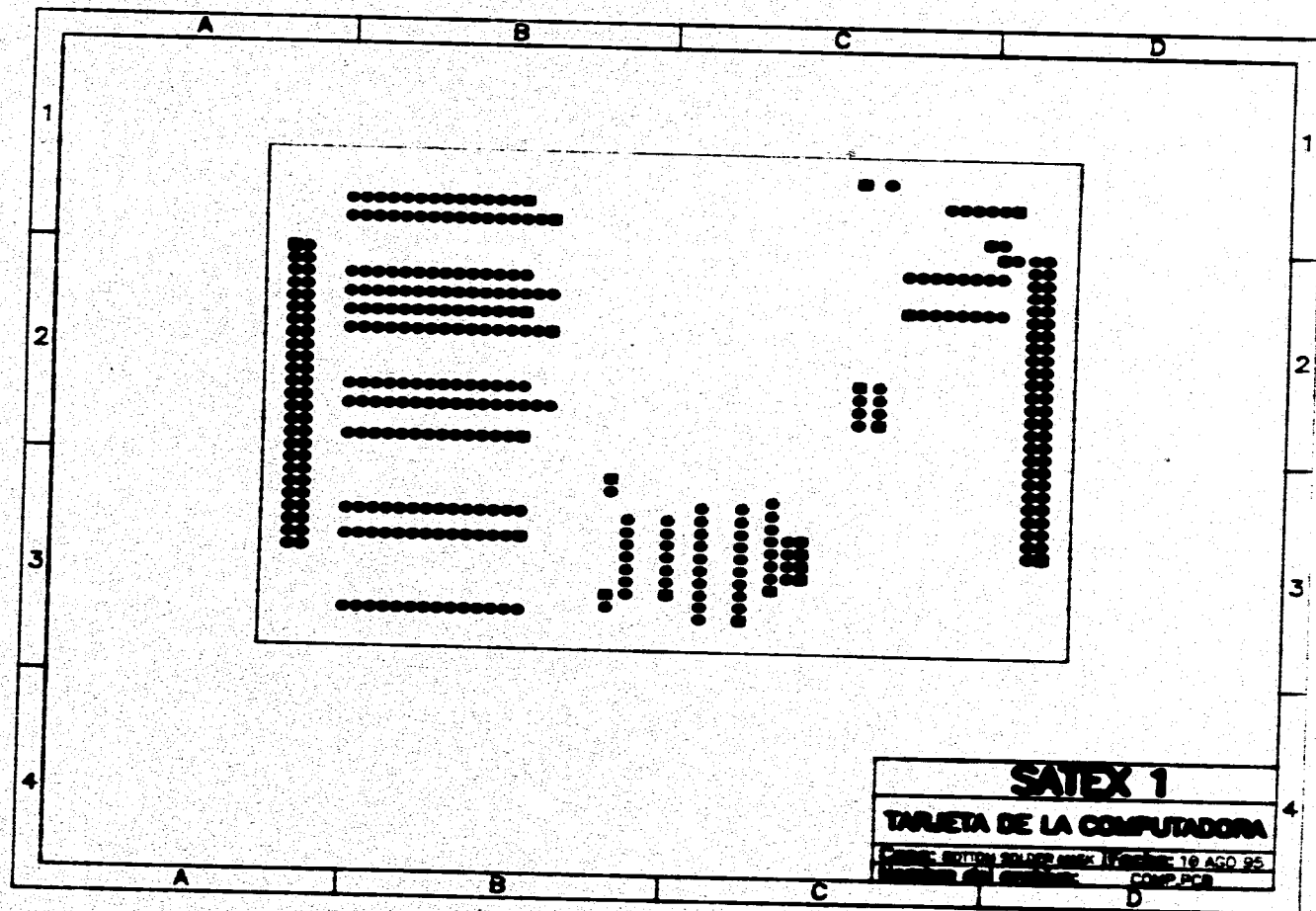


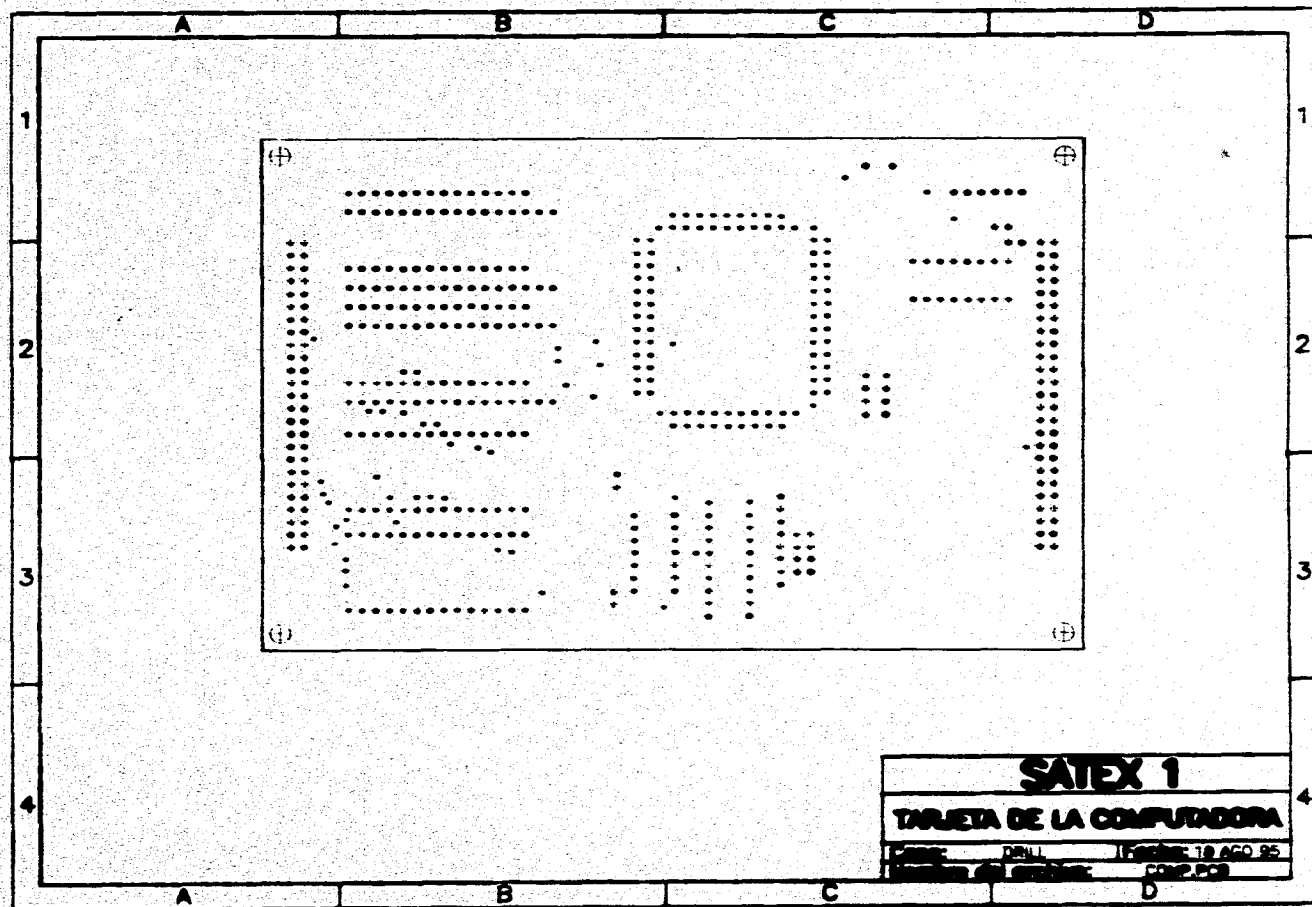












3) Algunos sensores externos al teleadquisidor tienen la electrónica de acondicionamiento dentro del teleadquisidor

En esta sección se describe la tarjeta que contiene la electrónica de acondicionamiento para los sensores del primer y tercer punto arriba indicados, específicamente contiene el acondicionamiento para los siguientes sensores.

	Interno
	Interno
	Interno
	Interno
	Interno
	Interno
	Externos
	Externos
	Externos
	Externos

Tabla 5.2 Sensores cuyo acondicionamiento está dentro del teleadquisidor.

Como es lógico pensar, en el caso de sensores externos las señales respectivas entran por los conectores del gabinete del teleadquisidor. Estas se conducen hacia los conectores tipo bus (BUS 1 y BUS 2) localizados en los extremos de la tarjeta, de tal forma que la tarjeta de sensores toma las señales de dichos conectores y las lleva una por una a su respectiva electrónica de acondicionamiento. Posteriormente cada salida acondicionada se lleva a un módulo de multiplexaje, en cuya salida se tiene electrónica de filtrado y recorte, todo esto integrado en esta tarjeta. Estas salidas nuevamente se llevan a los conectores tipo bus (BUS 3 y BUS 4) por donde viajarán hasta los módulos del convertidor A/D de las microcomputadoras de vuelo incluidas dentro del teleadquisidor.

Adicionalmente, por esta tarjeta circulan otras líneas que en unos casos se dirigen hacia las microcomputadoras y en otros casos se trata de líneas de salida provenientes de la computadora de vuelo.

En las figuras 5.4a y 5.4b se indican los conectores correspondientes a esta tarjeta así como las señales que los integran y en la figura 5.5 se muestra el diagrama de bloques de la electrónica contenida en esta tarjeta.

BUS1		BUS3	
1	LIB ARIANE 2	1	LIB ARIANE 2
2	LIB ARIANE 1	2	LIB ARIANE 1
3	RX2 INTERNA CCD	3	RX2 INTERNA CCD
4	TX2 INTERNA CCD	4	TX2 INTERNA CCD
5	TERMISTOR 2A	5	+5VCP
6	+5VSENS	6	+5VSENS
7	TERMISTOR 1A	7	+5VELEC
8	GNDSENS	8	GNDSENS
9	+5VPOT	9	
10	+12VSENS	10	+12VSENS
11	SAL MUX2-SENS	11	SAL MUX2-SENS
12	SAL MUX3-SENS	12	SAL MUX3-SENS
13	SAL MUX1-SENS	13	SAL MUX1-SENS
14	SAL MUX4-SENS	14	SAL MUX4-SENS
15	SAL MUX1-MAG	15	SAL MUX1-MAG
16	SAL MUX2-MAG	16	SAL MUX2-MAG
17	SAL MUX4-MAG	17	SAL MUX4-MAG
18	SC -12VELEC	18	
19	SAL MUX3-MAG	19	SAL MUX3-MAG
20	TX EXTERNA VHF1	20	TX EXTERNA VHF1
21	TX EXTERNA VHF2	21	TX EXTERNA VHF2
22	GNDSENS	22	GNDSENS
23	+12VSENS	23	+12VSENS
24	+5VSENS	24	+5VSENS
25		25	
26	RX EXTERNA VHF1	26	RX EXTERNA VHF1
27	RX EXTERNA VHF2	27	RX EXTERNA VHF2
28	RX1 EXTERNA	28	RX1 EXTERNA
29	SFS Y2	29	
30	TX1 EXTERNA C.U.	30	TX1 EXTERNA C.U.
31	SFS X2	31	
32	SFS Y1	32	
33	GNDMAG	33	GNDMAG
34	SFS X1	34	
35	+5VMAG	35	+5VMAG
36	+12VMAG	36	+12VMAG
37	MAG. Z1	37	
38	MAG. Z2	38	
39	MAG. Y1	39	
40	MAG. Y2	40	
41	MAG. X1	41	
42	MAG. X2	42	
43	SAL 3 SENS LIBRE	43	
44	SAL 4 SENS LIBRE	44	
45	CANAL 8 A/D LIBRE	45	CANAL 8 A/D LIBRE
46	SAL 5 SENS LIBRE	46	SAL 5 SENS LIBRE
47	CANAL 9 A/D LIBRE	47	CANAL 9 A/D LIBRE
48	+12VPOT	48	+12VELEC
49	-12VPOT	49	-12VELEC
50		50	

Figura 5.4a Conectores laterales izquierdos de la tarjeta de sensores.

BUS4		BUS2	
SEL-BTM1	1	SEL-BTM1	1
GNDPOT	2	GNDPOT	2
+5VPOT	3	+5VPOT	3
BTM Z(-)	4	BTM Z(-)	4
+12VPOT	5	+12VPOT	5
BTM Y(-)	6	BTM Y(-)	6
-12VPOT	7	-12VPOT	7
BTM X(-)	8	BTM X(-)	8
ON CCD POT	9	ON CCD POT	9
BTM Z(+)	10	BTM Z(+)	10
ON VHF2 POT	11	ON VHF2 POT	11
BTM Y(+)	12	BTM Y(+)	12
ON VHF1 POT	13	ON VHF1 POT	13
BTM X(+)	14	BTM X(+)	14
BOOM2 POT	15	BOOM2 POT	15
GNDSENS	16	GNDSENS	16
BOOM1 POT	17	BOOM1 POT	17
+5VCR	18	+5VCR	18
ANTENAS POT	19	ANTENAS POT	19
	20		20
A MUX-SENS	21	A MUX-SENS	21
B MUX-SENS	22	B MUX-SENS	22
C MUX-SENS	23	C MUX-SENS	23
	24	TERMISTOR 4A	24
	25	TERMISTOR 3A	25
	26	SAL2 SENS LIBRE	26
B MUX-MAG	27	B MUX-MAG	27
A MUX-MAG	28	A MUX-MAG	28
DT CHECA COMPS.	29	DT CHECA COMPS.	29
GNDSENS	30	GNDSENS	30
SEL-BTM2	31	SEL-BTM2	31
	32		32
	33		33
+5VSENS	34	+5VSENS	34
RX2 INTERNA CUO	35	RX2 INTERNA CUO	35
TX2 INTERNA CUO	36	TX2 INTERNA CUO	36
ON CR CUO	37	ON CR CUO	37
	38		38
	39	SAL1 SENS LIBRE	39
GNDSENS	40	GNDSENS	40
BOOM2 DT	41	BOOM2 DT	41
	42		42
BOOM1 DT	43	BOOM1 DT	43
+5VSENS	44	+5VSENS	44
RX2 INTERNA DT	45	RX2 INTERNA DT	45
	46		46
TX2 INTERNA DT	47	TX2 INTERNA DT	47
ON ELEC CTRL DT	48	ON ELEC CTRL DT	48
ANTENAS DT	49	ANTENAS DT	49
ON CR DT	50	ON CR DT	50

Figura 5.4b Conectores laterales derechos de la tarjeta de sensores.

En la siguiente hoja se muestra el circuito esquemático de la tarjeta de sensores. Al igual que en las tarjetas de microcomputadoras y control la tarjeta de sensores está compuesta por tres capas, las cuales contienen todas las líneas de interconexiones del impreso, sin embargo como también ocurrió en las tarjetas descritas en los párrafos anteriores se necesitan generar otras 5 capas las cuales son utilizadas por compañías manufactureras para fabricar los impresos. Después del esquemático de la tarjeta se muestran cada una de las capas generadas para la tarjeta de sensores.

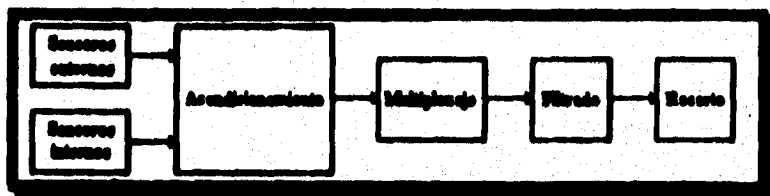


Figura 5.6 Diagrama de bloques de la electrónica contenida en la tarjeta de sensores.

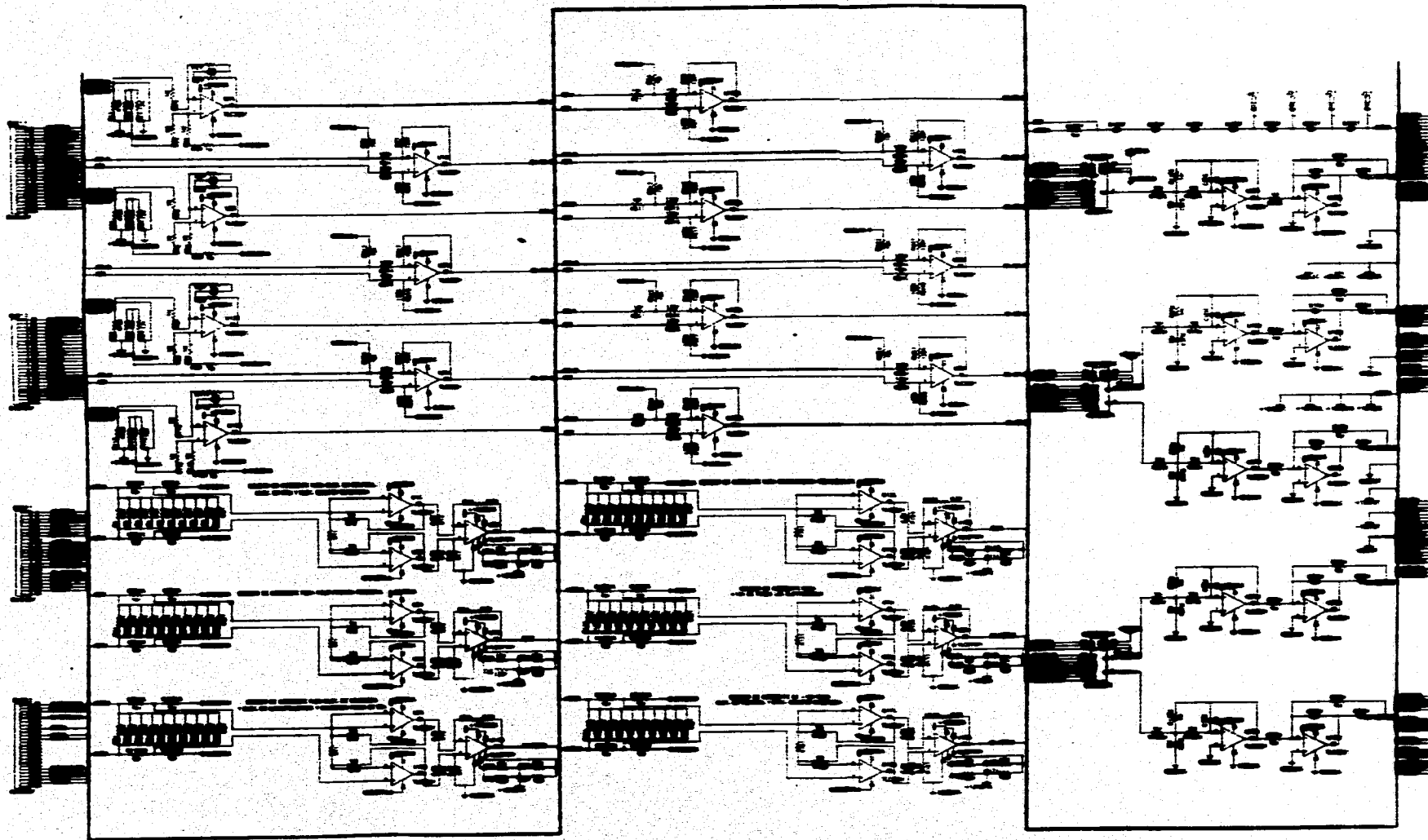
5.3 Tarjeta de conectores

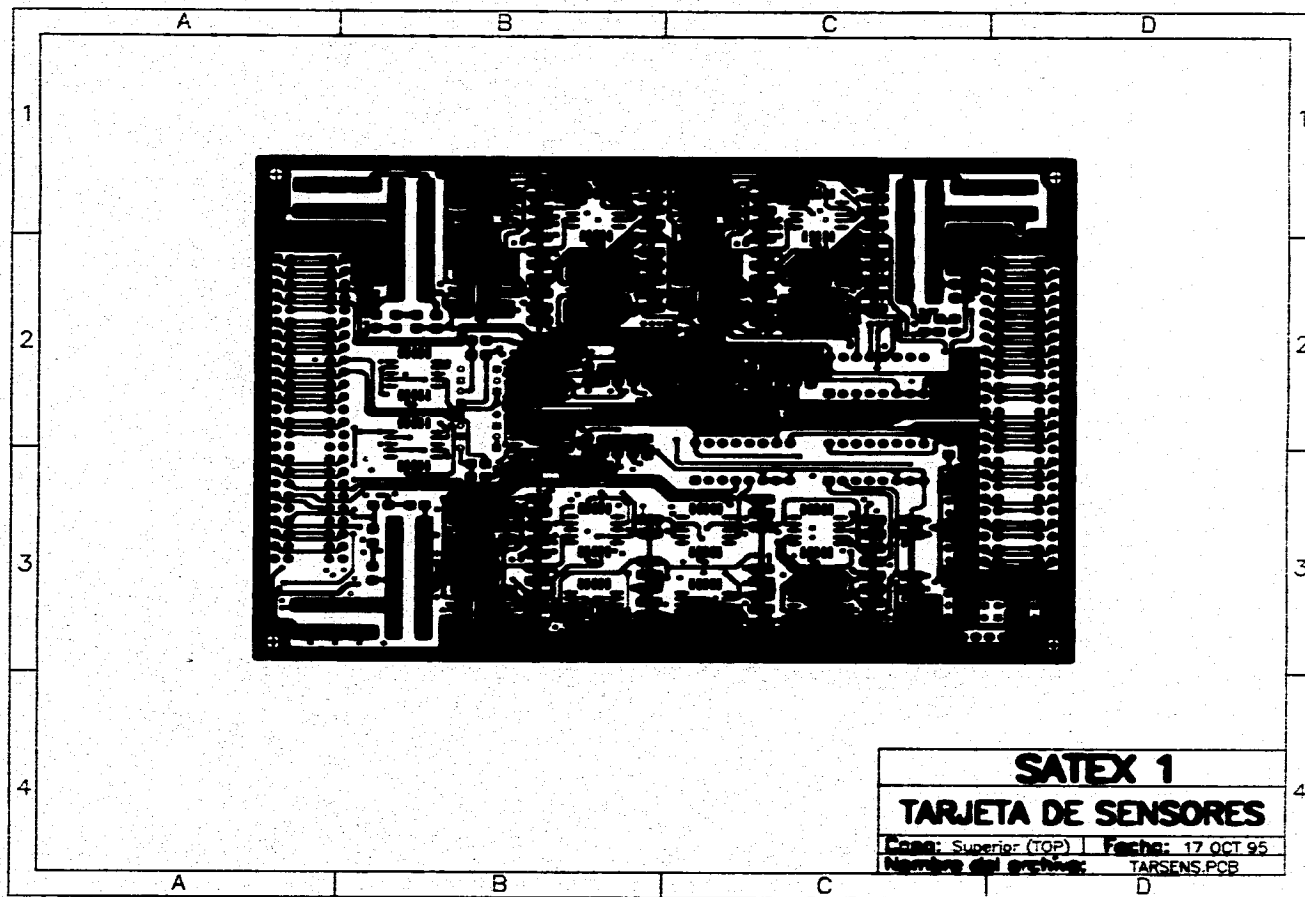
La última tarjeta integrada en el interior del telescopio está constituida por la tarjeta cuya función primordial es la de recibir las señales que entren al telescopio así como de ofrecer las líneas de salida que permiten controlar los diversos actuadores del satélite.

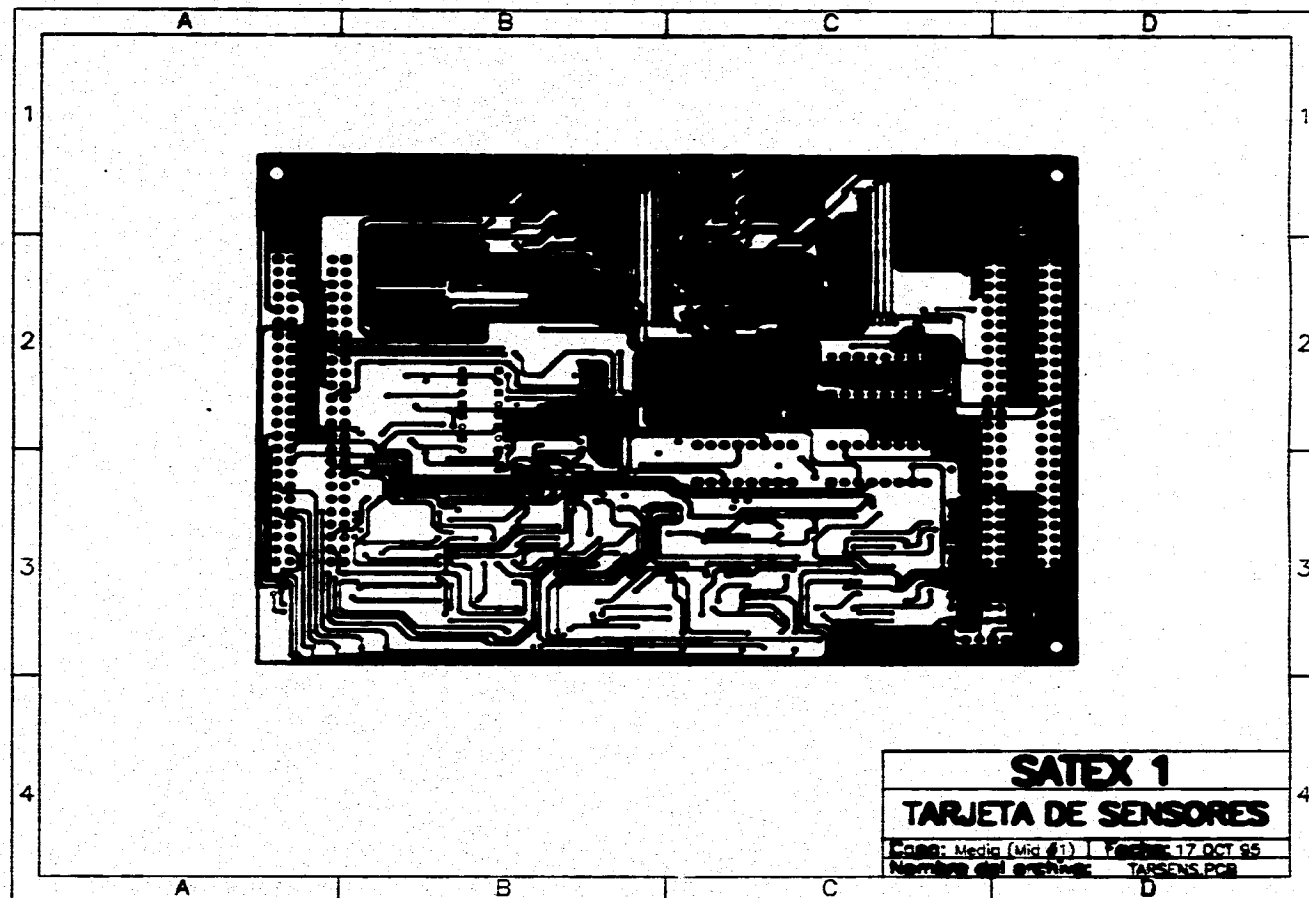
Adicionalmente esta tarjeta contiene tres multiplexores analógicos de 8 a 1 a los cuales llegan las señales de sensores externos que cuentan con acondicionamiento externo. Las salidas de los 3 multiplexores se llevan cada una a etapas de filtrado y recorte, posteriormente se llevan estas salidas a los conectores ubicados en los extremos izquierdo y derecho (BUS 1 y BUS 2) de la tarjeta por donde se conducen para poder llegar a los convertidores A/D de las microcomputadoras. En la figura 5.6 se presenta a los conectores BUS 1 y BUS 2 así como las señales que los componen.

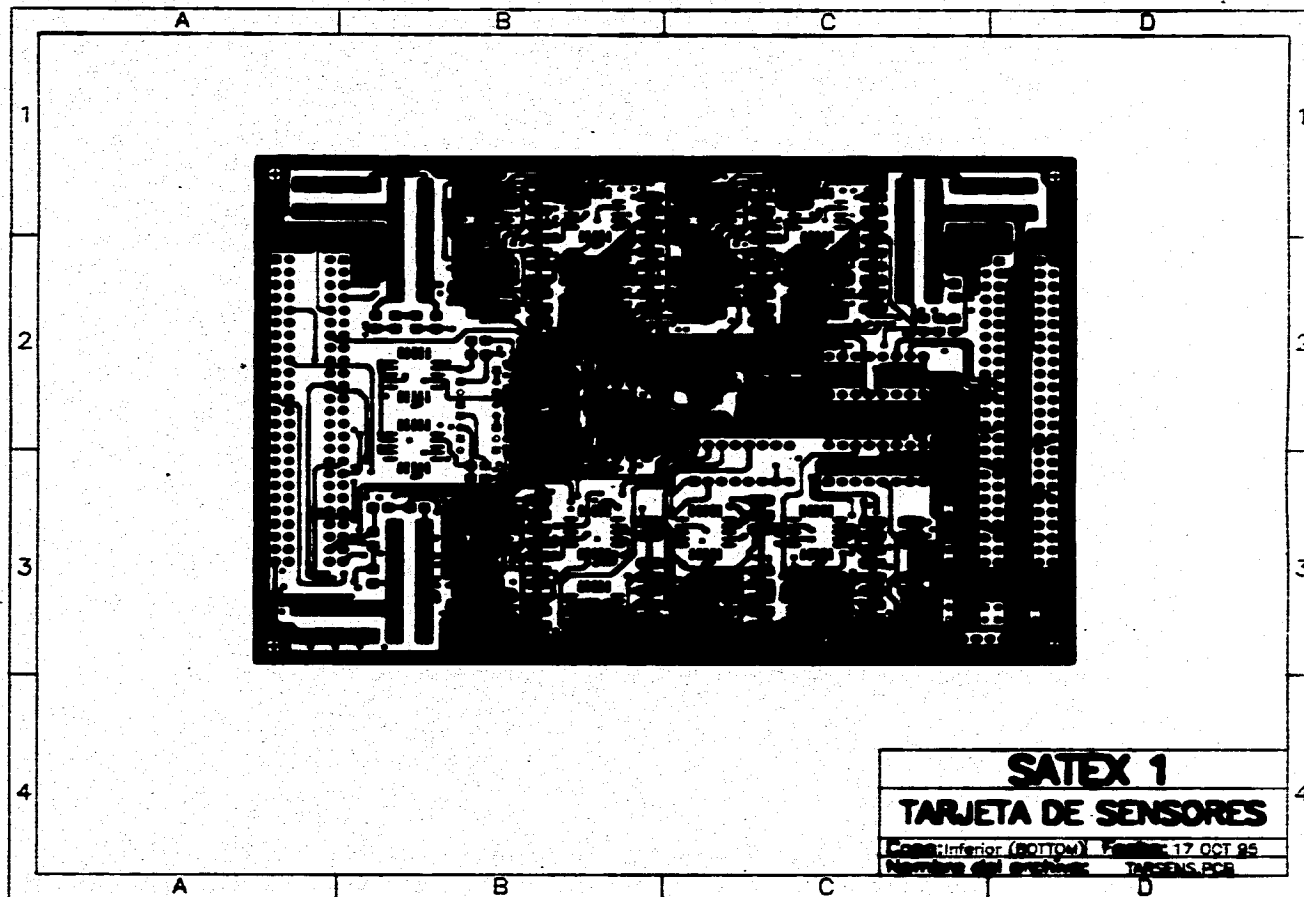
Por otro lado en esta tarjeta se tiene el sensor de temperatura del telescopio y a su electrónica de acondicionamiento cuya salida también está conectada a los Multiplexores de 8 a 1.

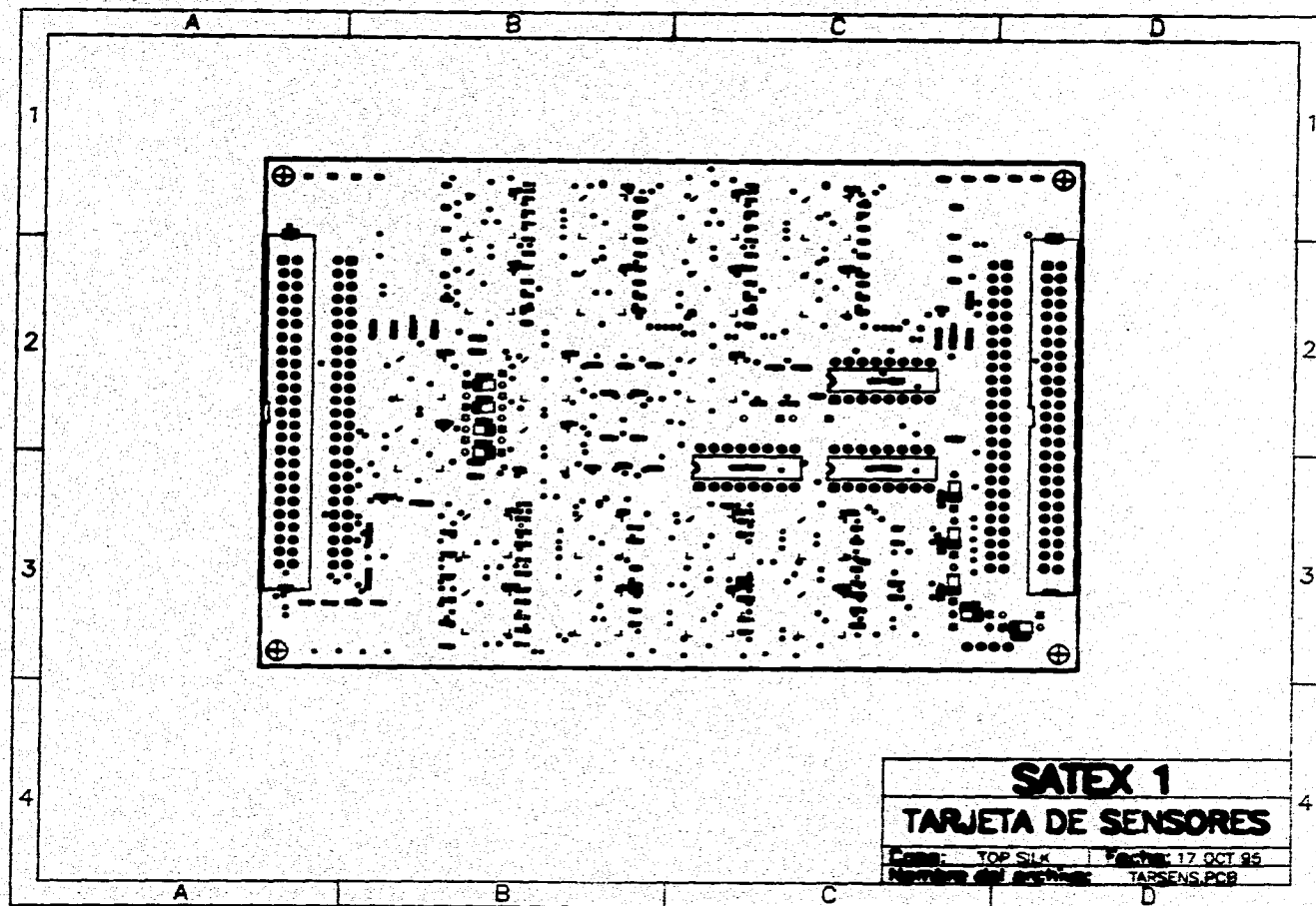
Los conectores de entrada y salida del telescopio que se muestran en el esquemático son los que se nombran en la siguiente tabla.

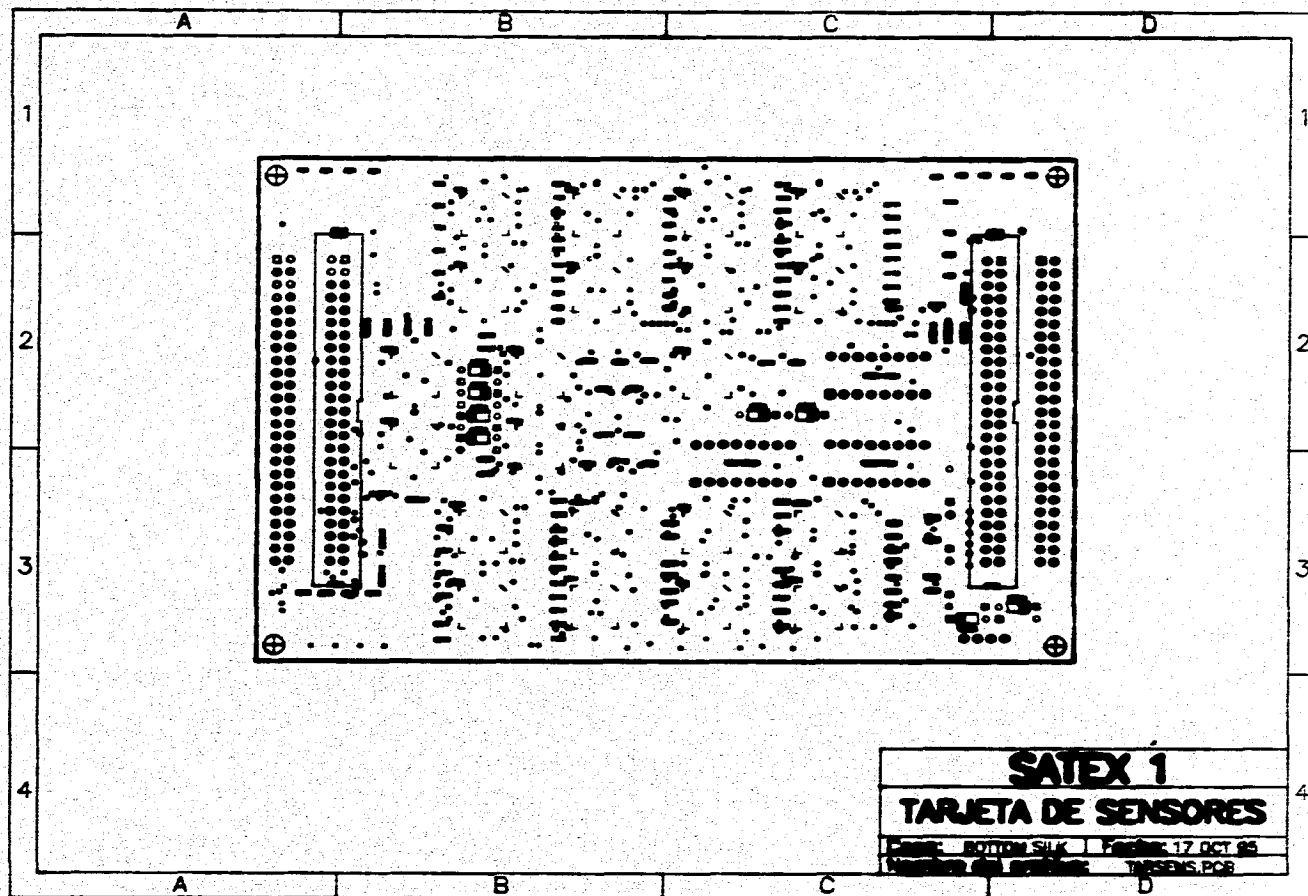


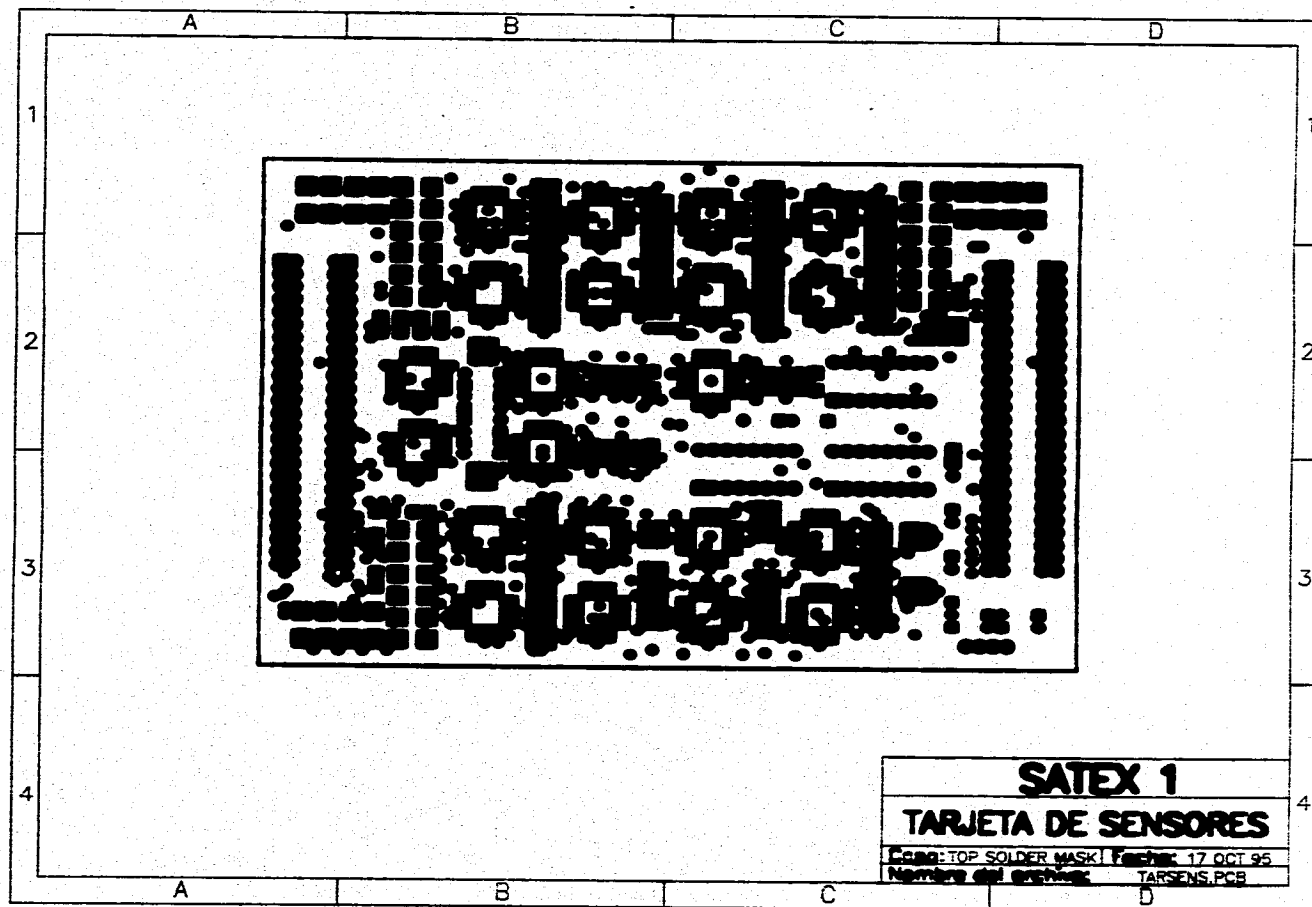


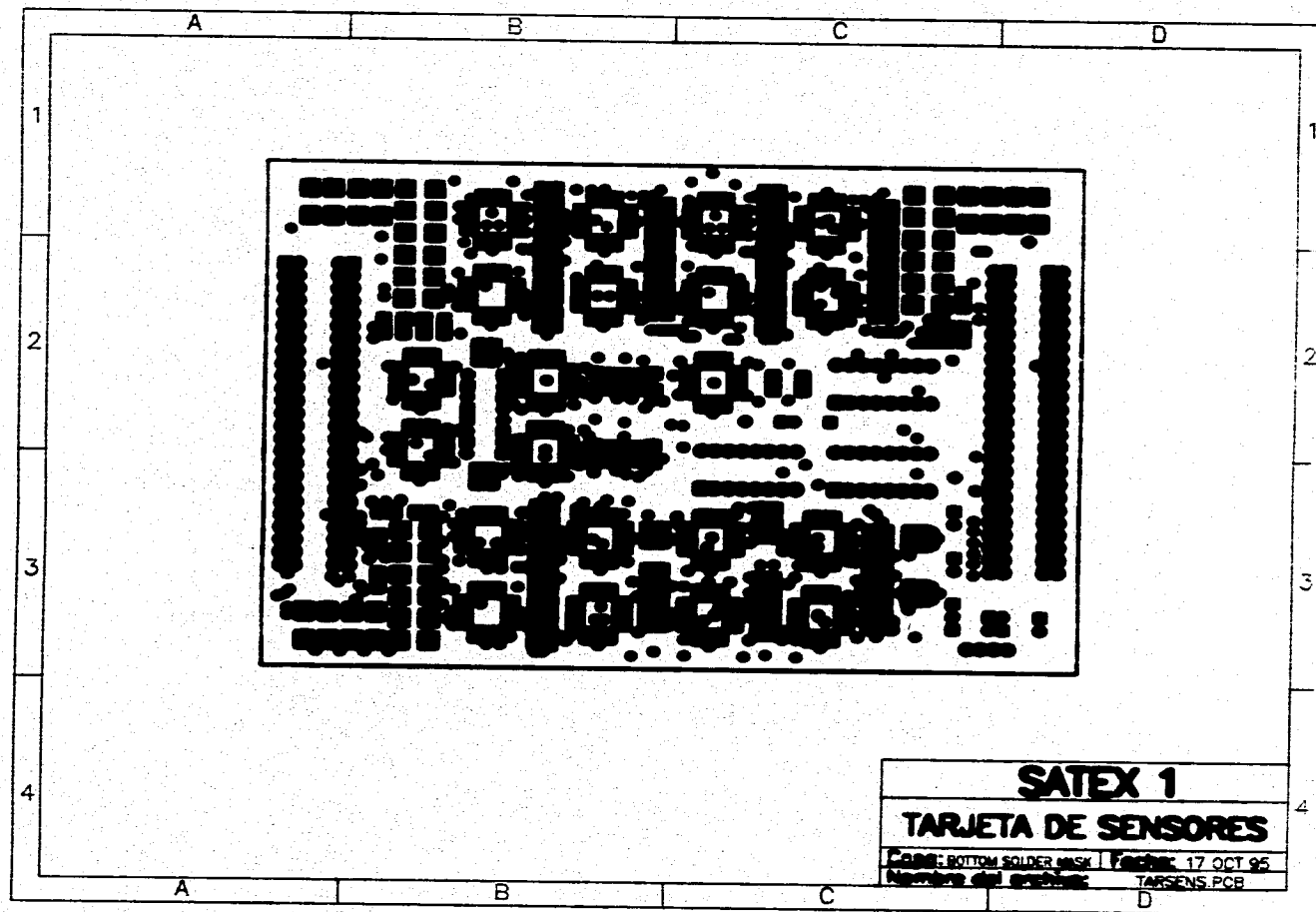


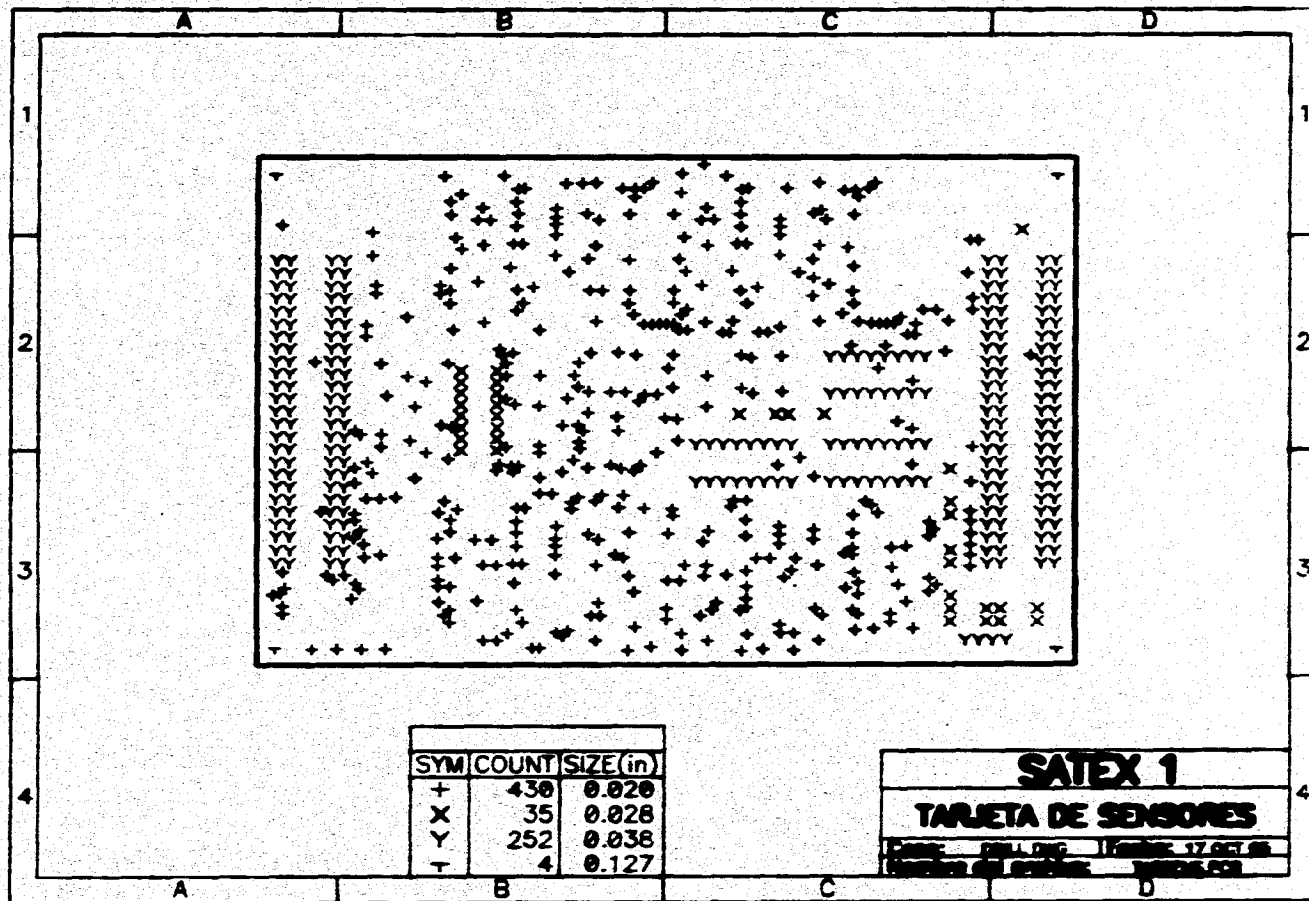












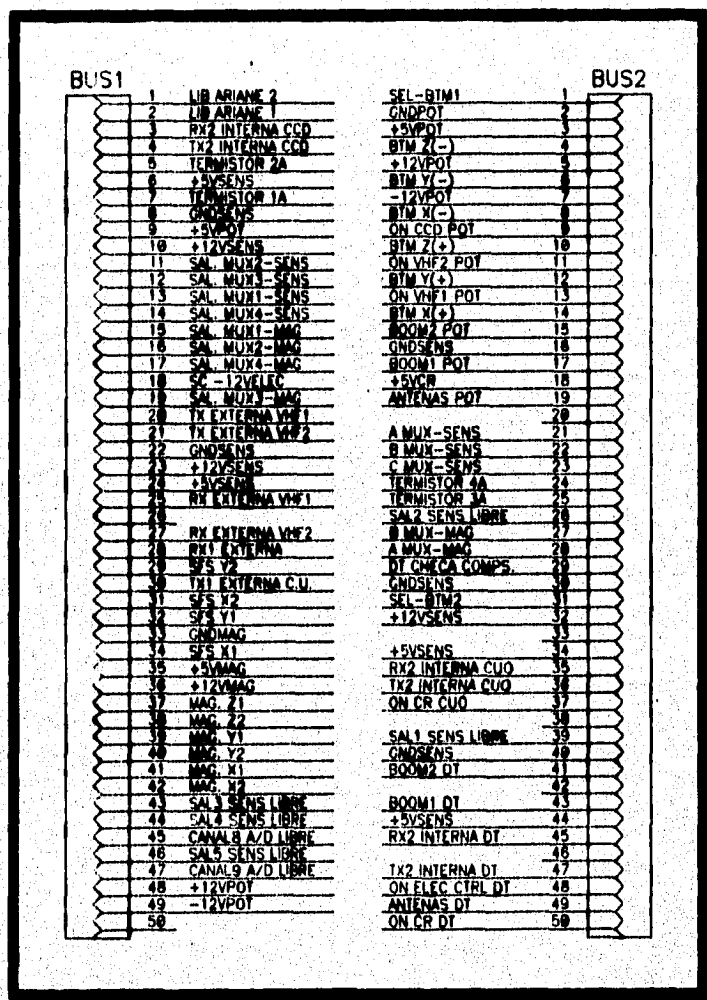


Figura 5.6 Conectores laterales de la tarjeta de conectores

ARIANE-CCD	089
VHF-C.U.	0825
TER-MAG-SFS	0837
POTENCIA	0837
CUO	0815
DT	0815

Tabla 5.3 Conectores externos del teleadquisidor.

En la siguiente hoja se muestra el circuito esquemático de la tarjeta de conectores.

Al igual que en el caso de las tarjetas anteriormente descritas, la tarjeta de conectores fue diseñada en tres capas y por consiguiente requirió para su fabricación la generación de 8 capas, las cuales se presentan después del esquemático respectivo.

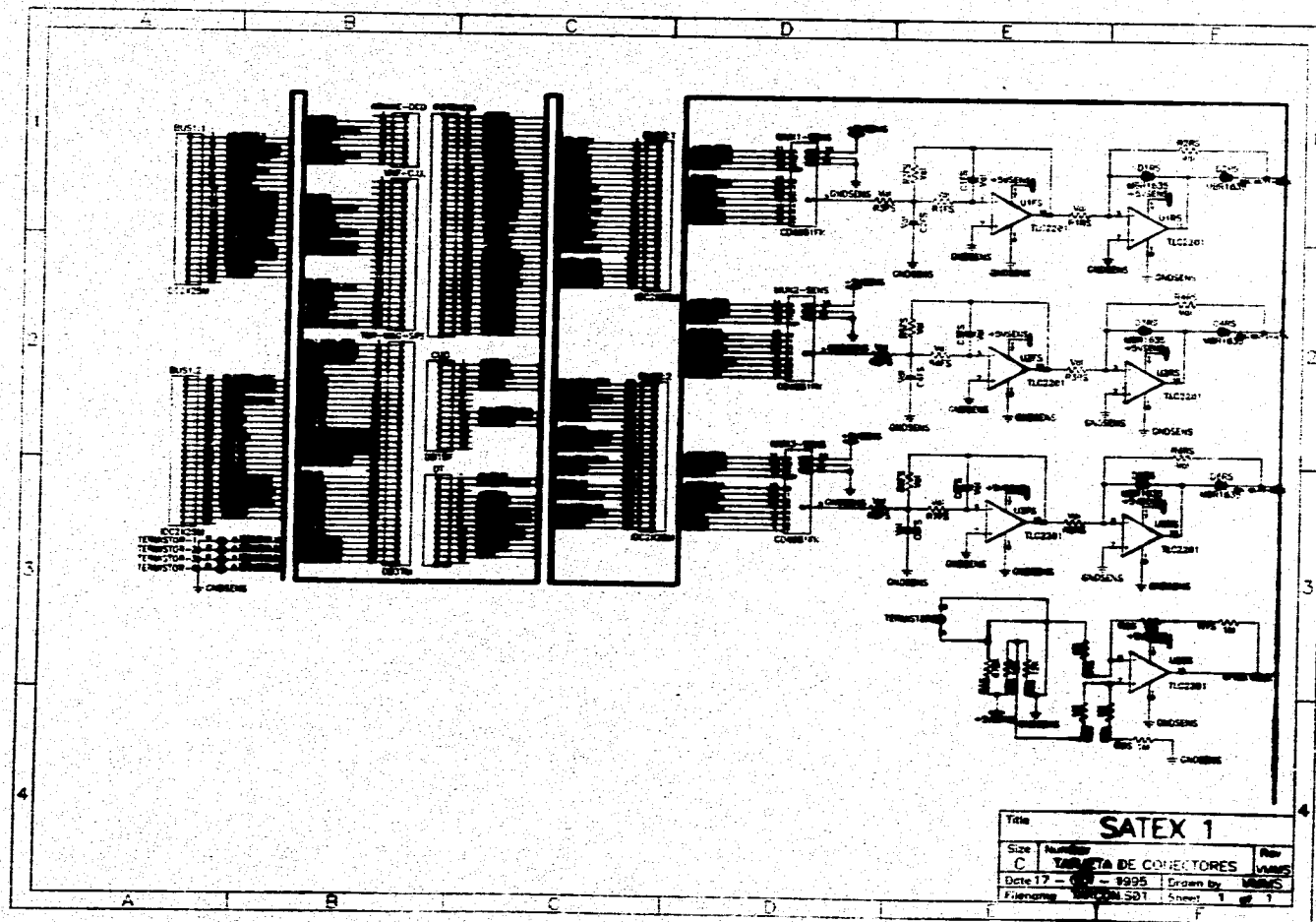
5.7 Tarjetas externas al teleadquisidor para sensores externos con su acondicionamiento externo.

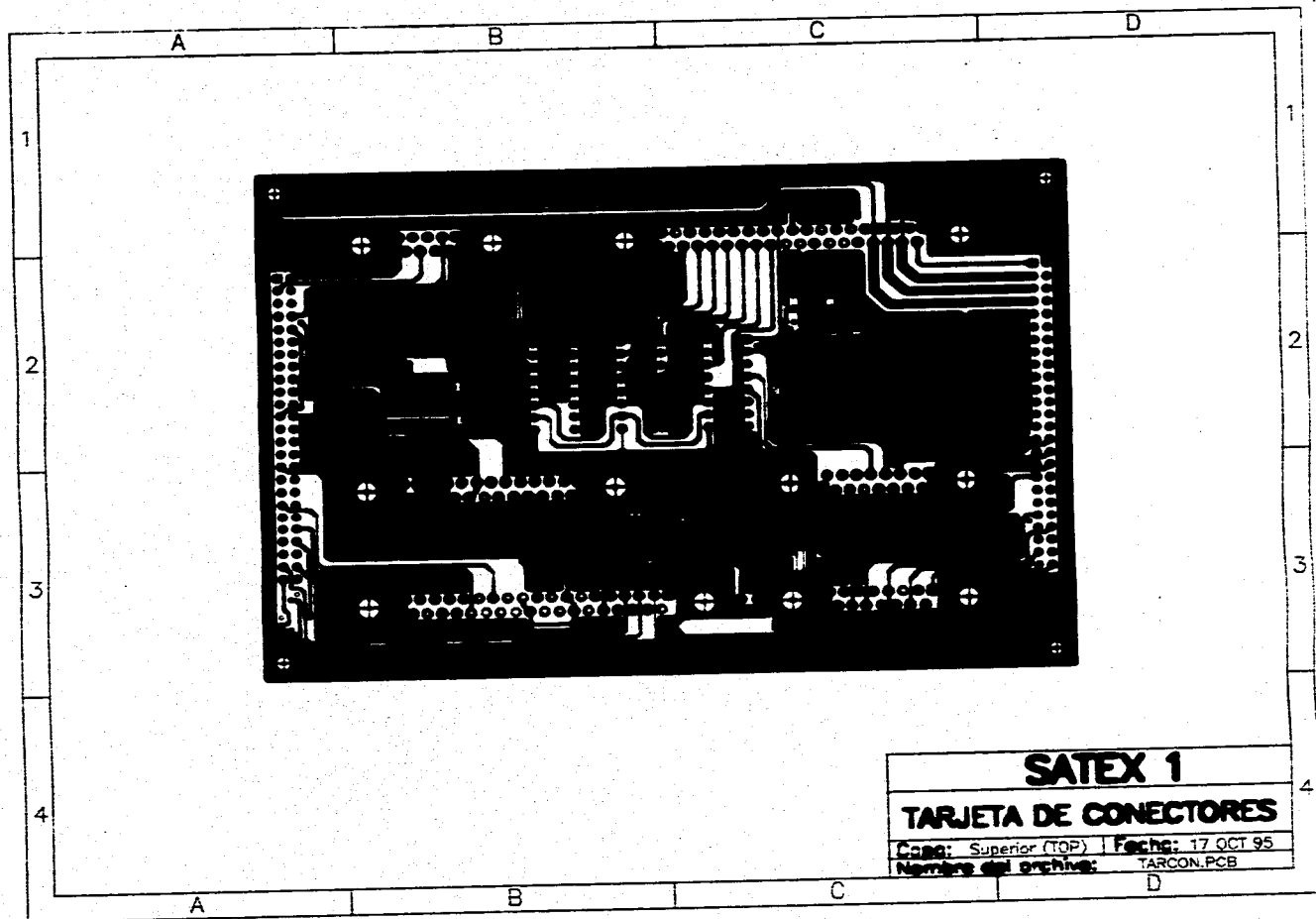
Como se muestra en las figuras 2.4 y 2.5 hay varias tarjetas externas al teleadquisidor las cuales contienen sensores de corriente, temperatura, y voltaje. De estas tarjetas hay 4 tipos diferentes:

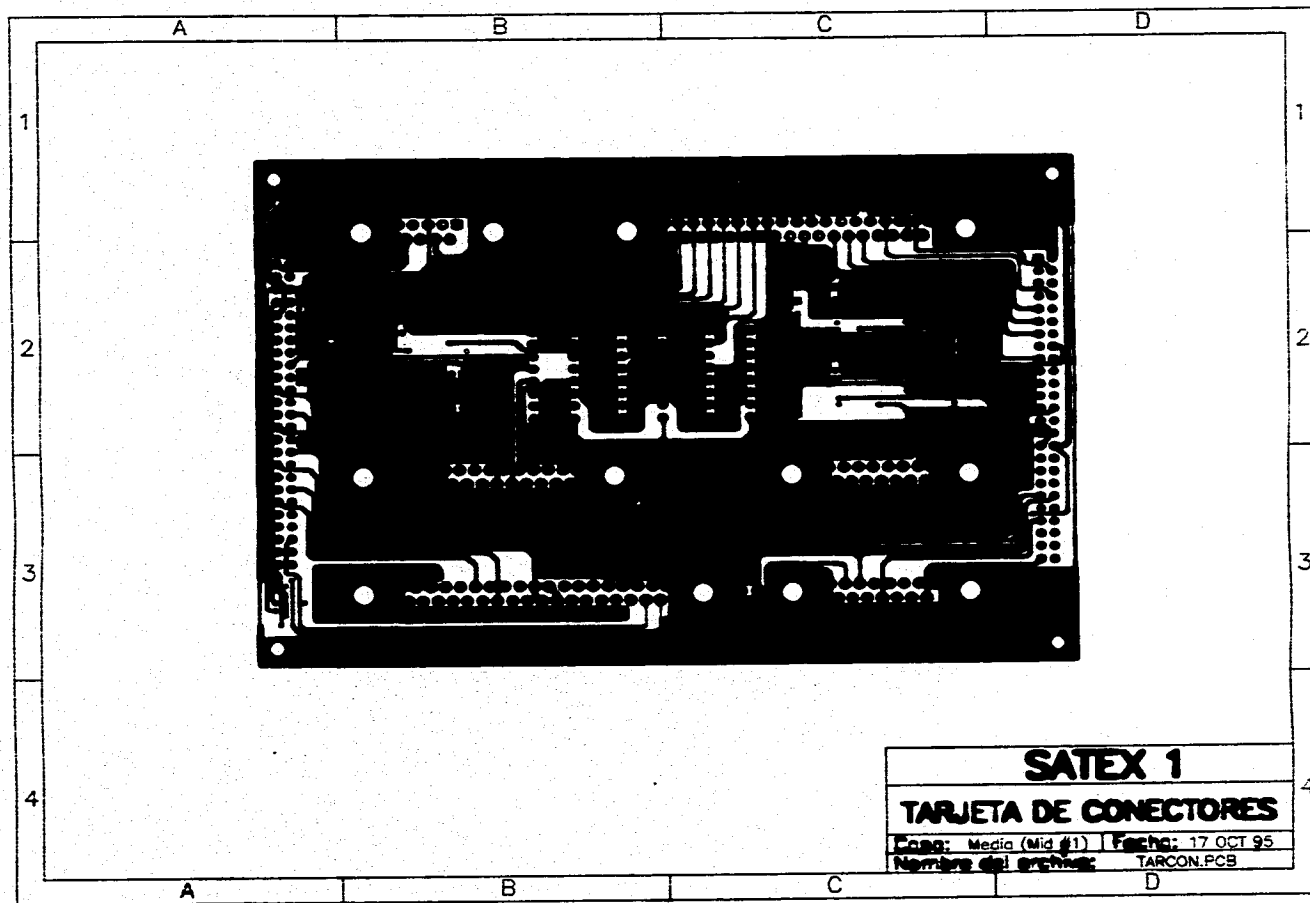
- Sensor de corriente más acondicionamiento.
- Sensor de temperatura y sensor de corriente con acondicionamiento.
- Sieta sensores de corriente.
- Seis sensores de corriente, acondicionamiento para 13 sensores de corriente y un sensor de voltaje con acondicionamiento.

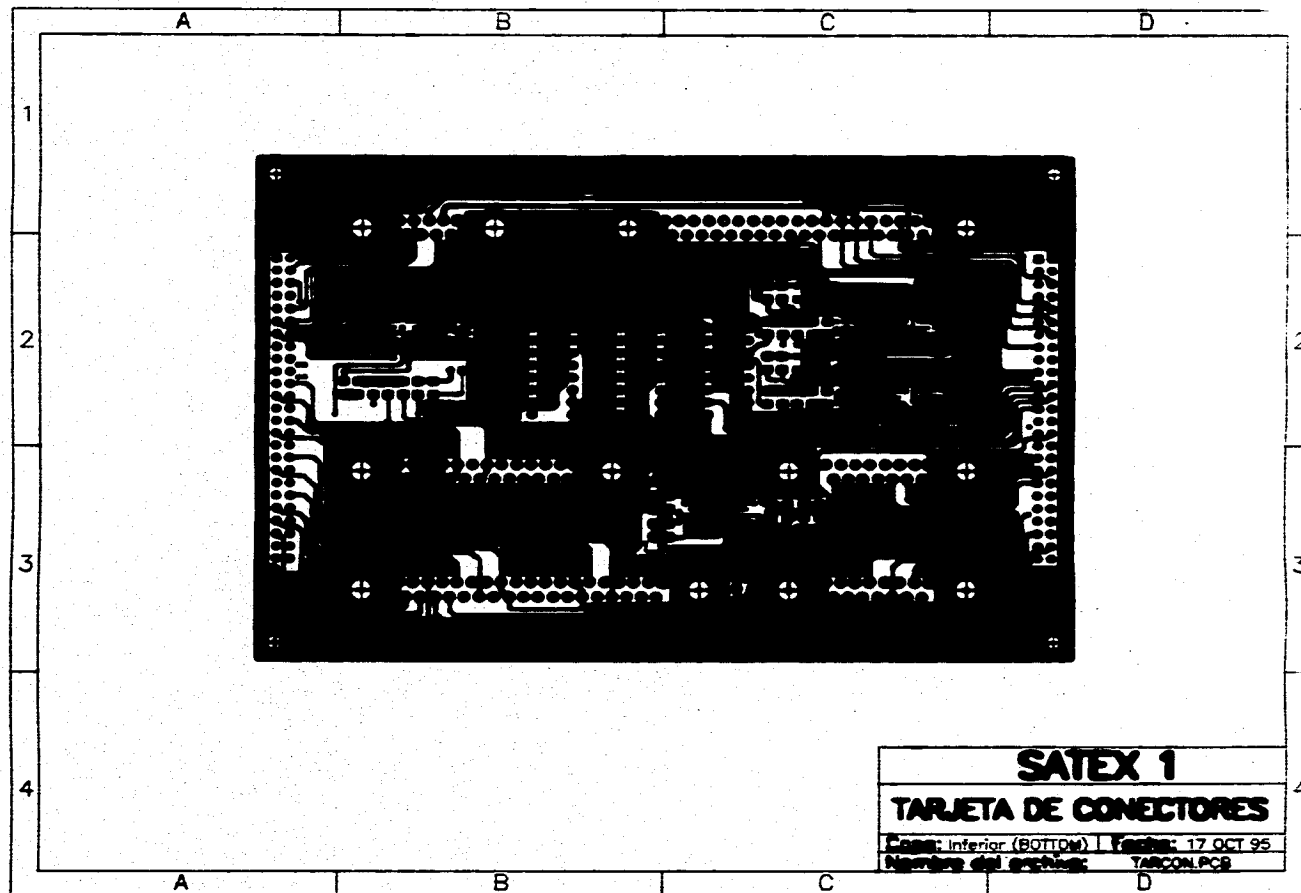
Los diseños de estas tarjetas se hicieron de forma similar a los demás circuitos impresos, con la ayuda del paquete "Tango".

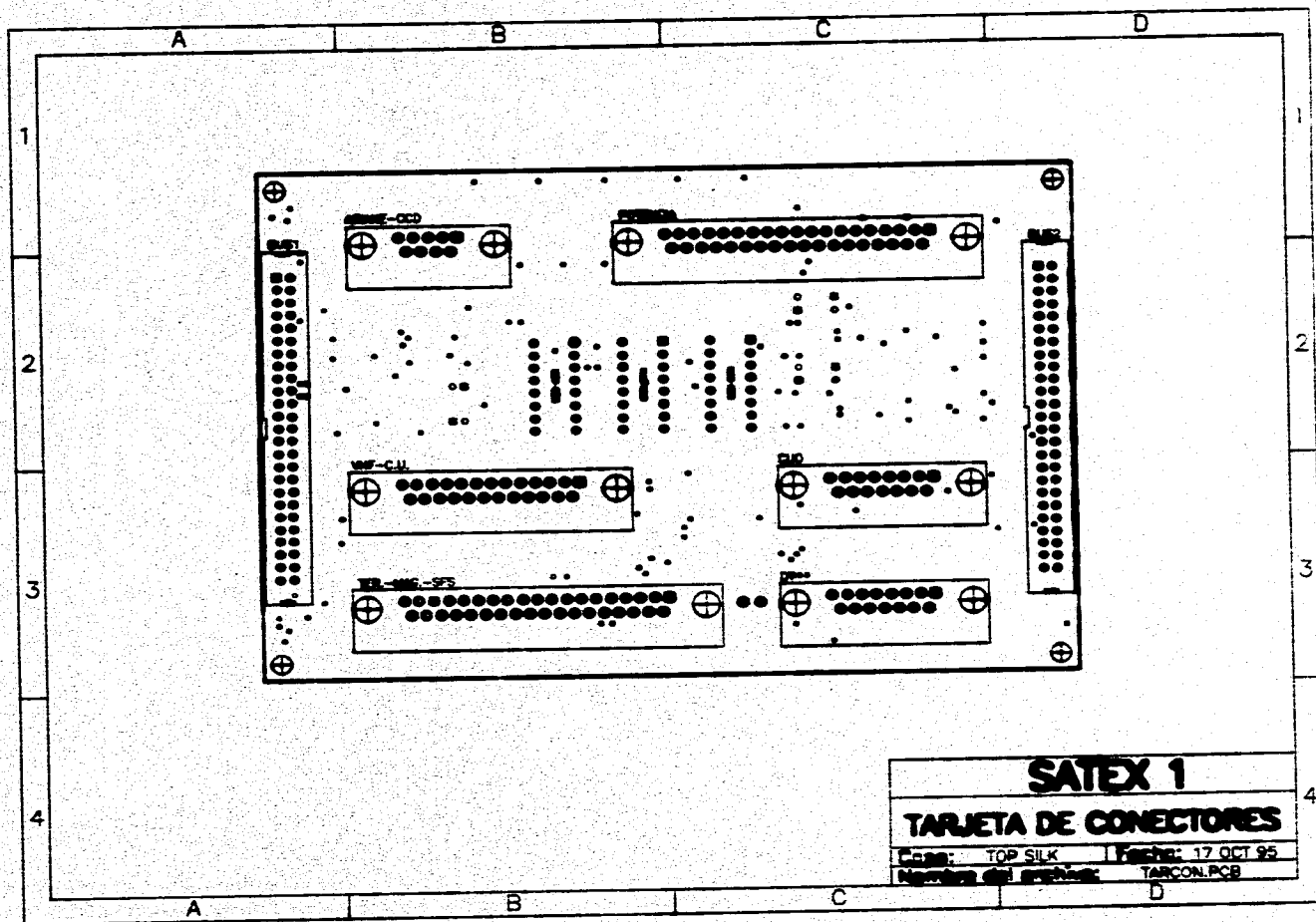
Los primeros 2 tipos de impresos tienen únicamente de 2 capas y circuitos integrados de montaje superficial en un solo lado. En la tabla 5.4 se ilustra el rango dinámico en que pueden operar cada uno de los sensores involucrados en estos impresos.

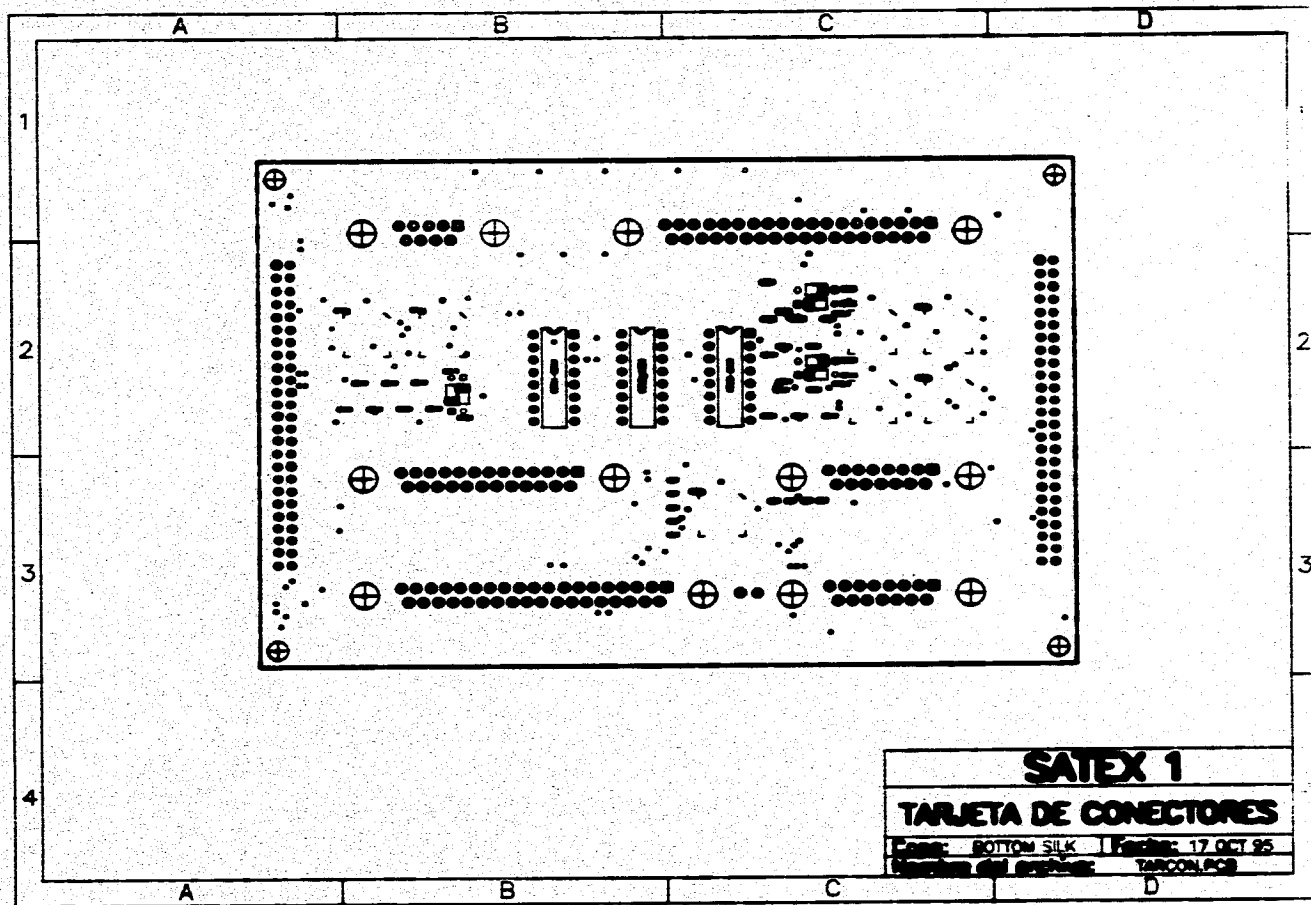


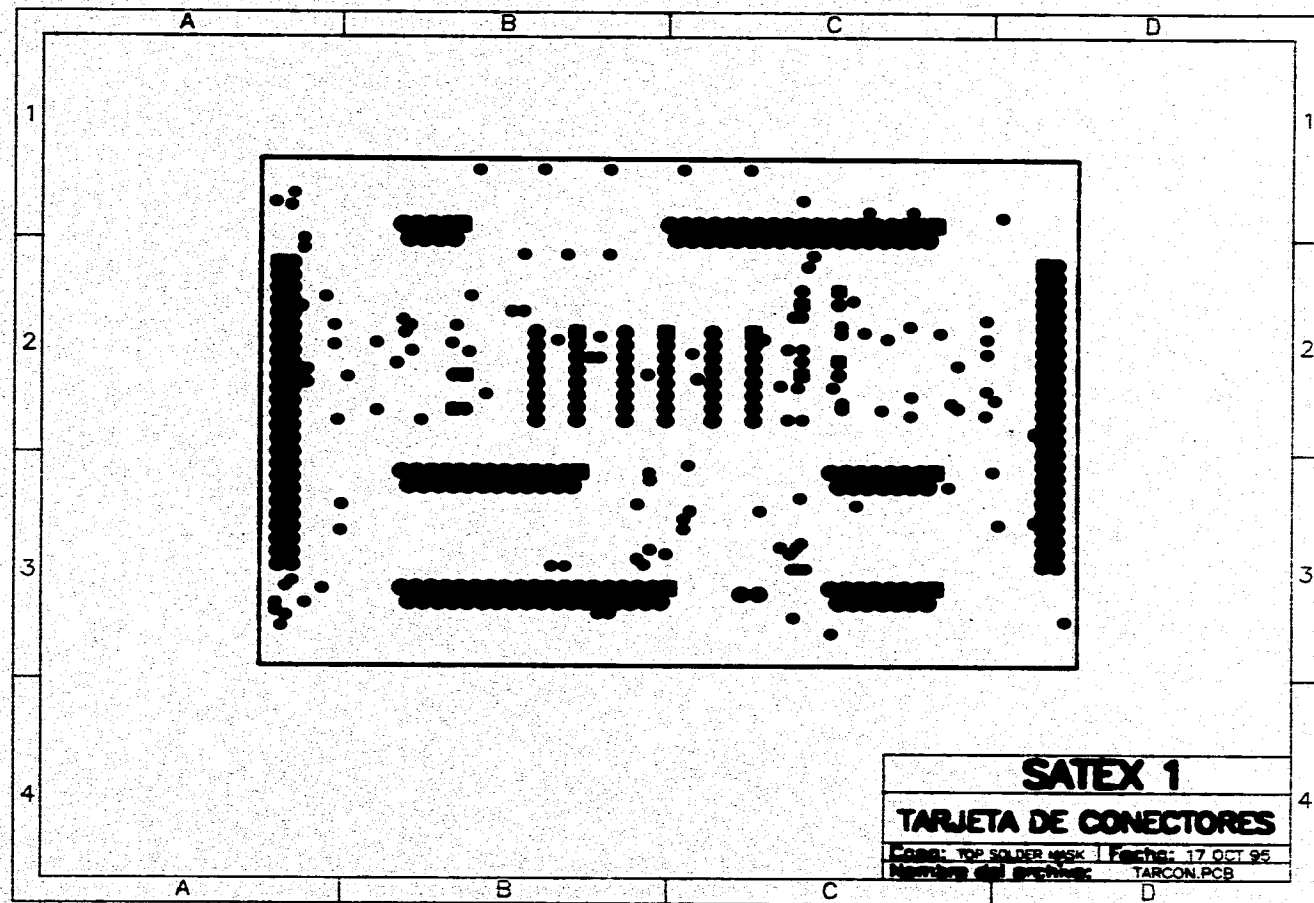


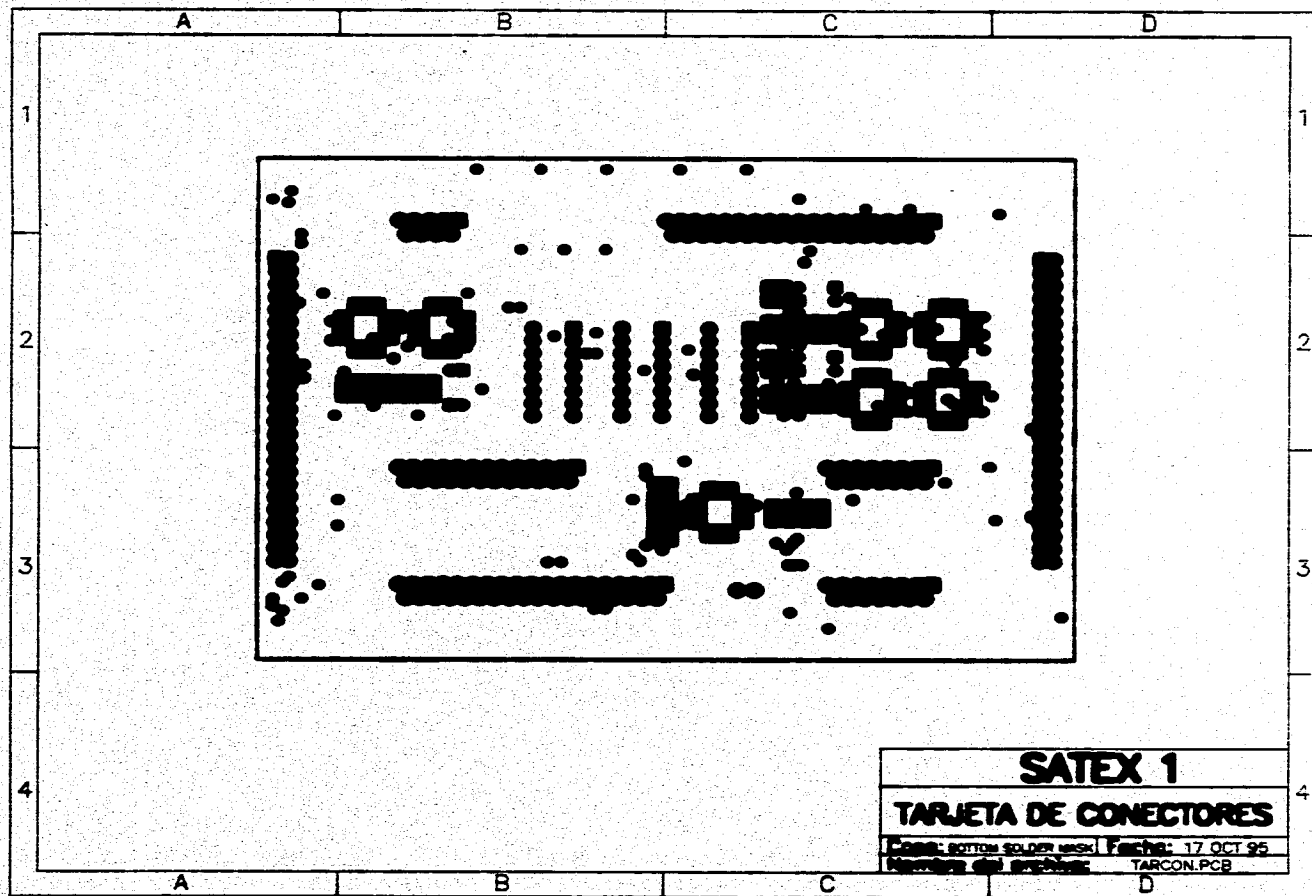












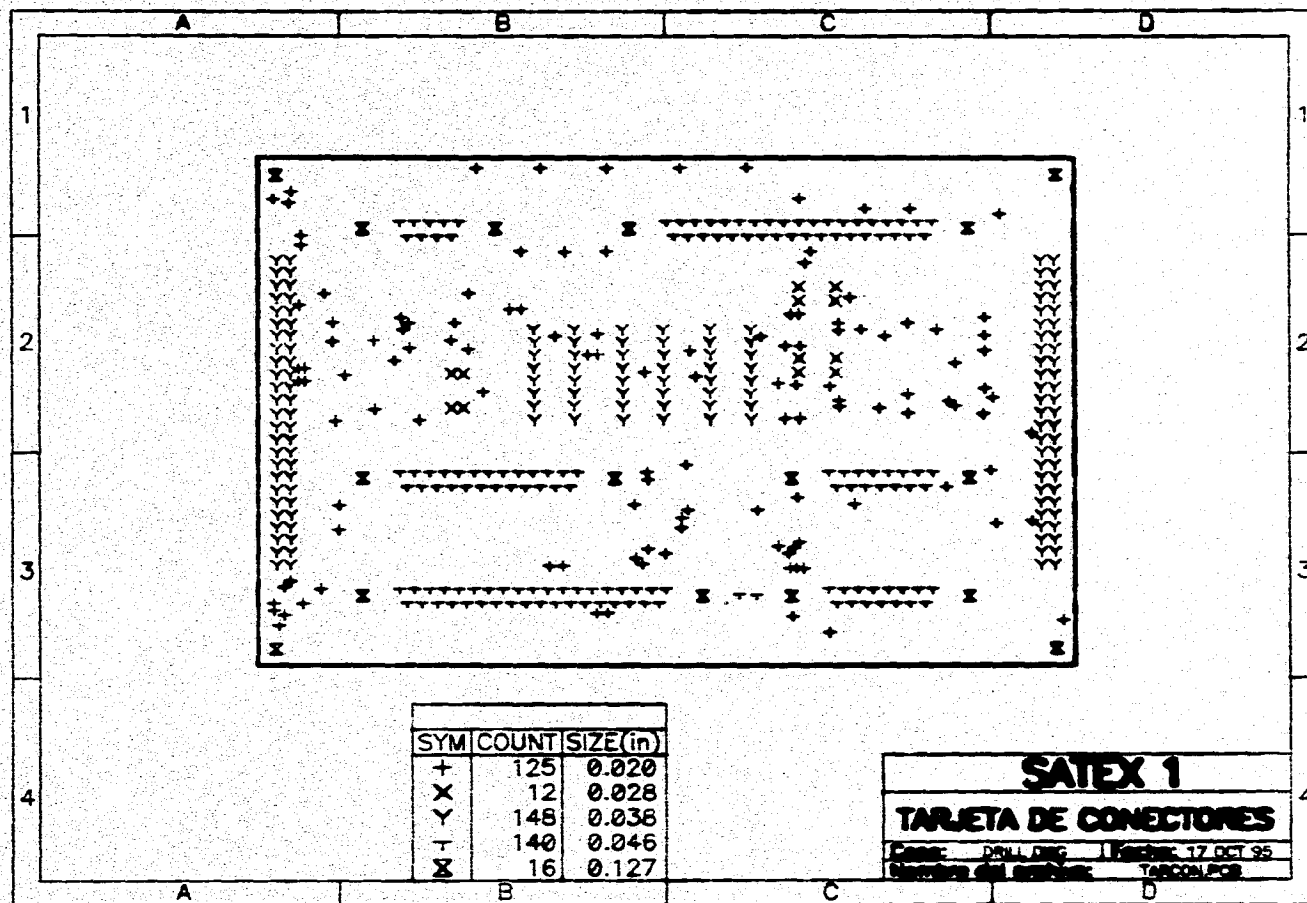




Tabla 5.4 Características de los sensores contenidos en los impresos tipo 1 2.

Los circuitos esquemáticos de estos sensores son similares a los de las figuras 4.1a y 4.3, en las siguientes se muestran las capas que se generaron para su fabricación.

El tercero y cuarto tipo de impresos estarán localizados en la fuente del satélite, debido a esto las dimensiones de los mismos se ajustaron a las medidas de los impresos de este módulo.

Uno de ellos es de dos capas y únicamente contiene arreglos de resistencias en paralelo que forman a los 7 sensores de corriente que se definen en la tabla 5.5.



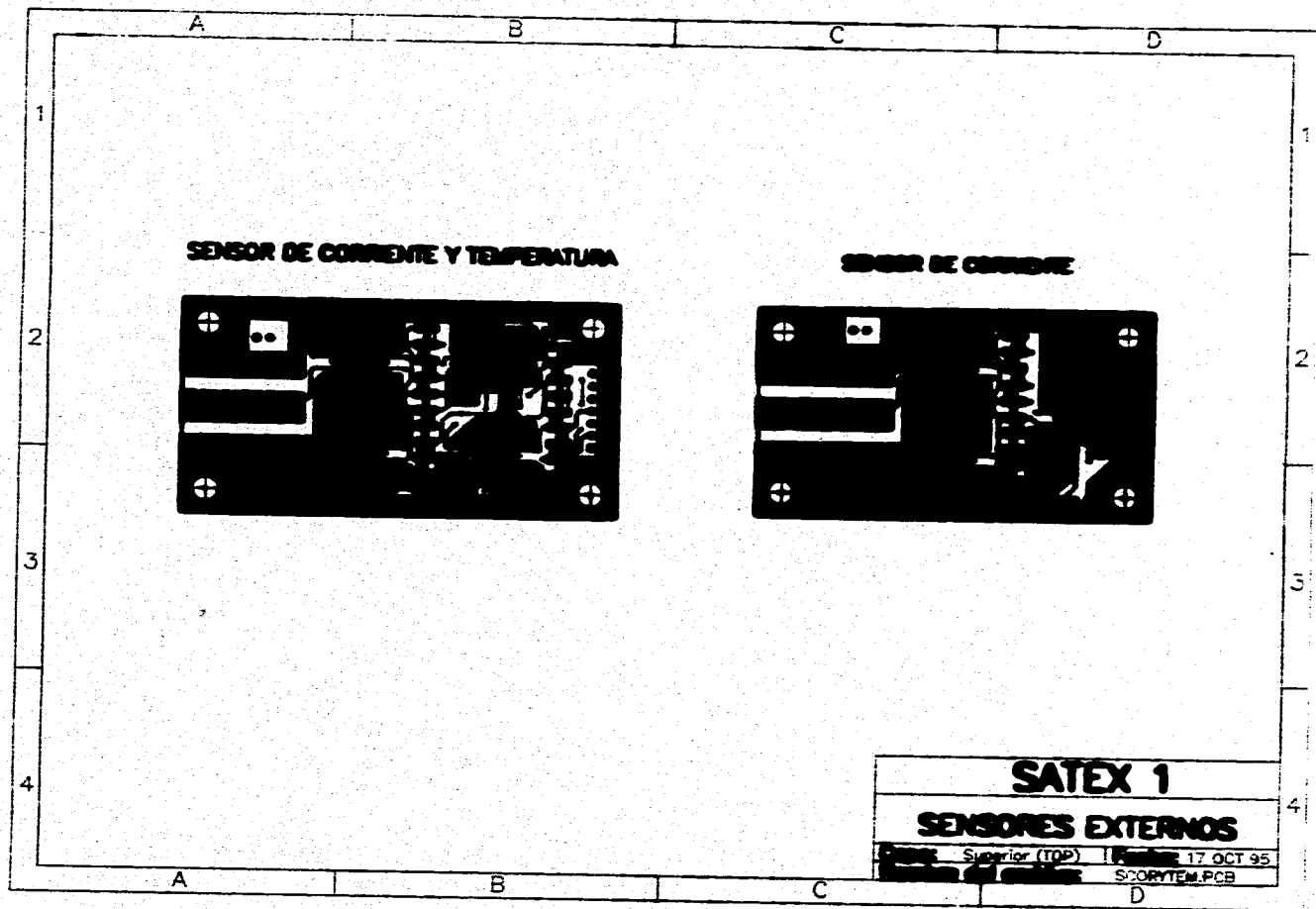
Tabla 5.5

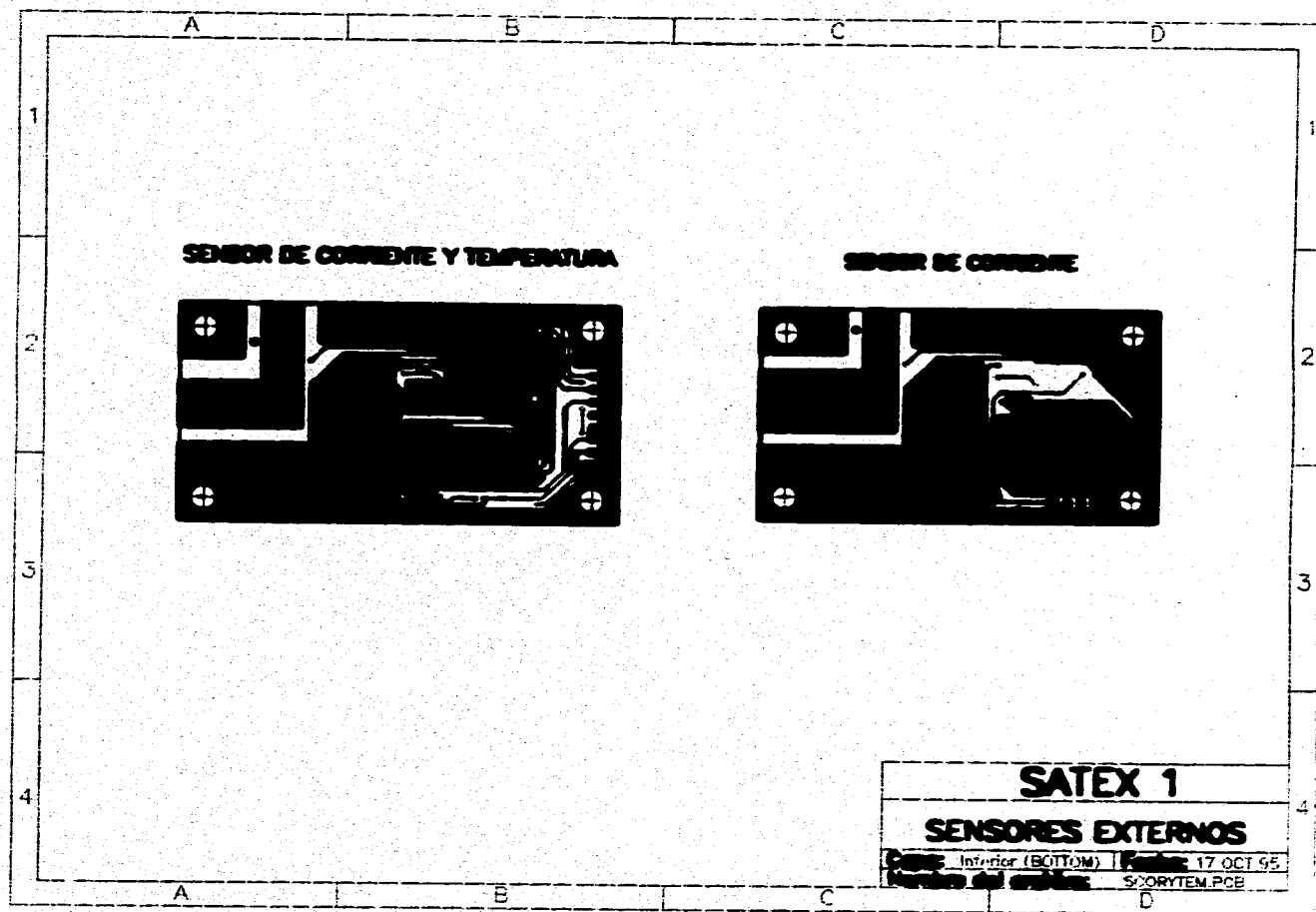
La decisión de ubicar estos sensores en otra tarjeta se basó en dos razones, la primera para trazar líneas de cobre más gruesas que soporten la corriente por conducir, y la segunda para evitar el uso de conectores de alta potencia los cuales son caros y pesados.

En las siguientes hojas se muestran las capas generadas para la fabricación de este impreso.

El último impreso es de tres capas con componentes de montaje superficial en ambos lados de la tarjeta, éste impreso contiene 6 sensores de corriente (para las bobinas de torque magnético) electrónica de acondicionamiento y un sensor de voltaje, además contiene acondicionamiento para los 7 sensores de corriente del circuito impresos descrito anteriormente.

El circuito esquemático y las capas generadas para la fabricación de este impreso se muestran también en seguida.

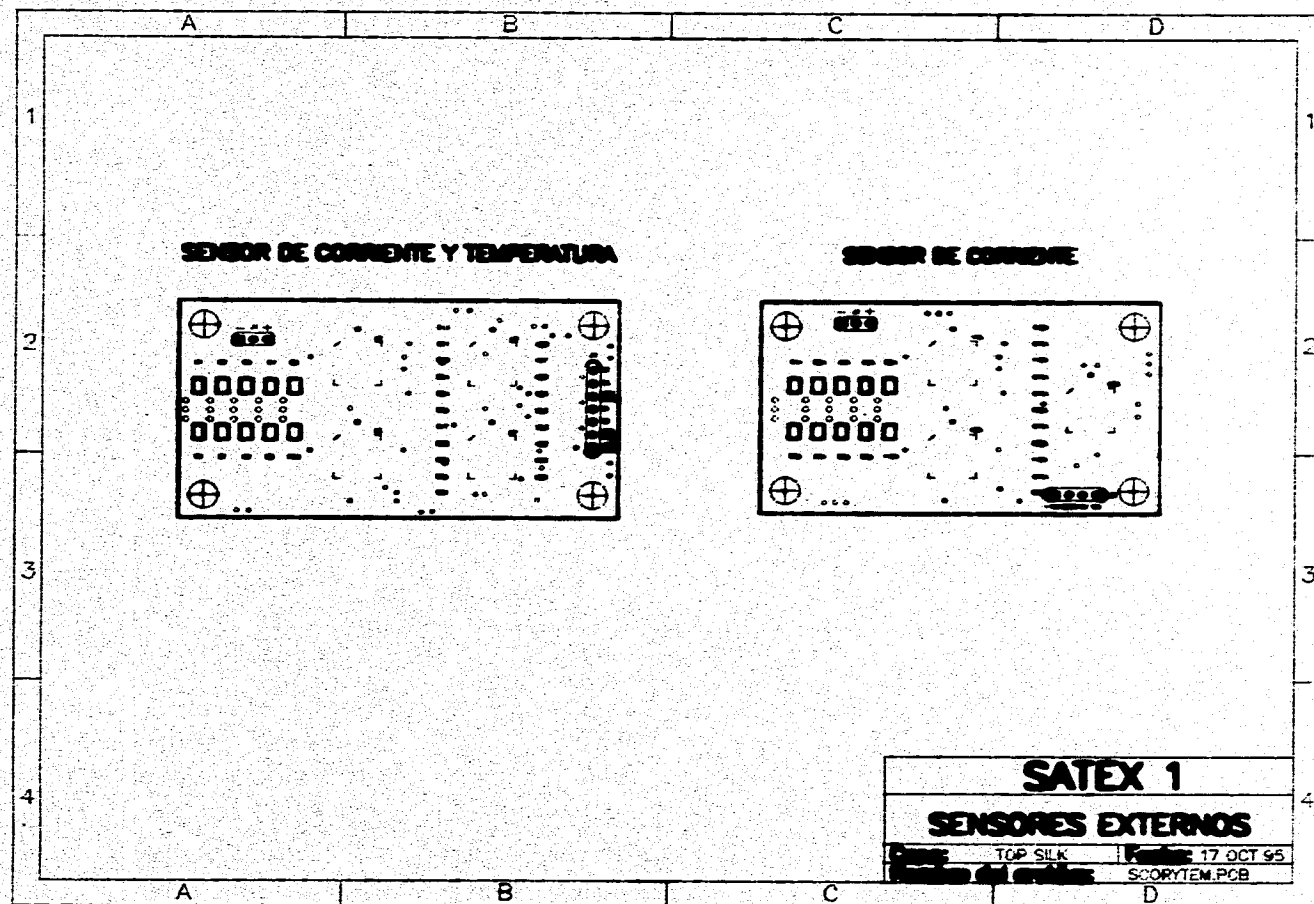


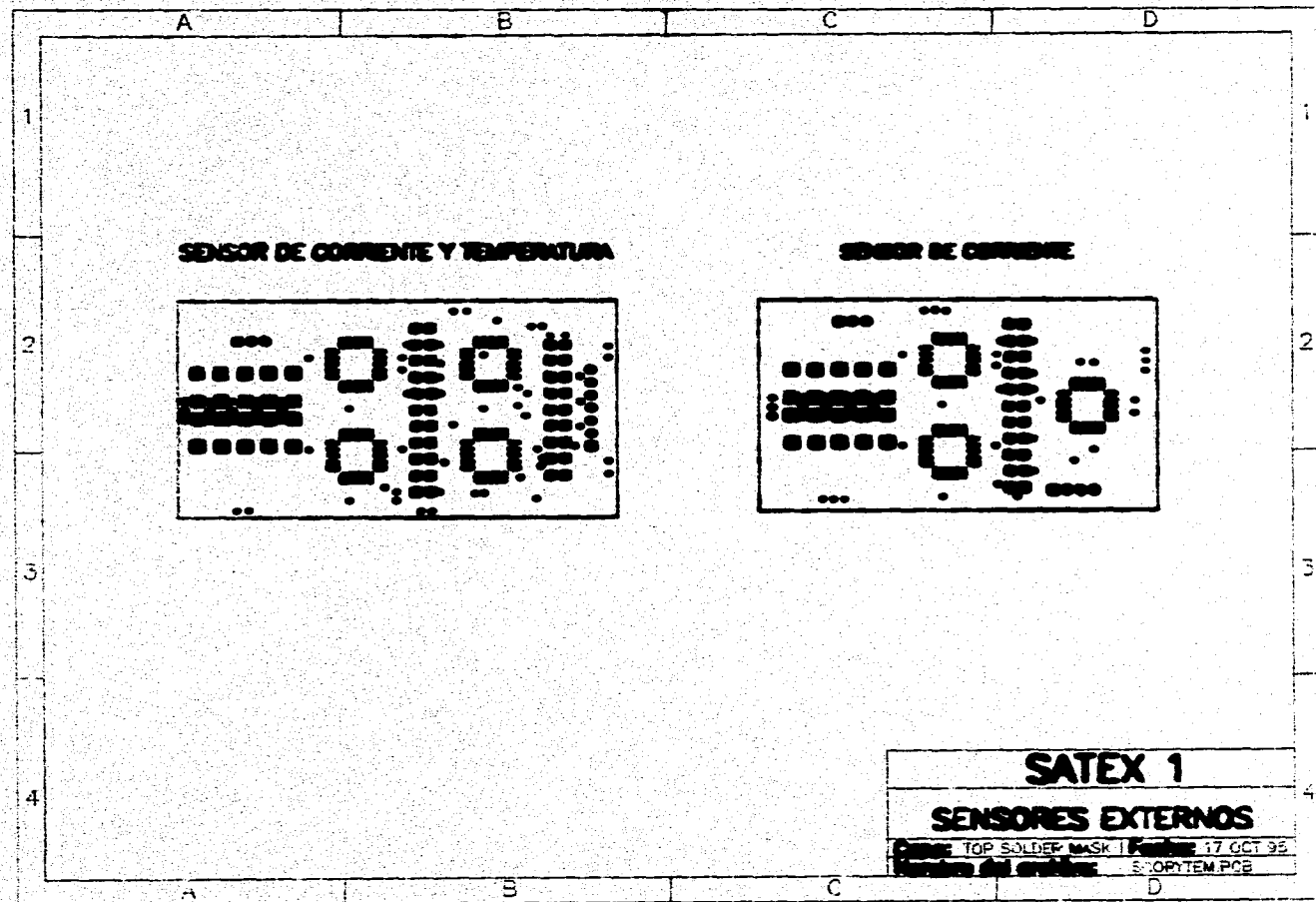


SATEX 1

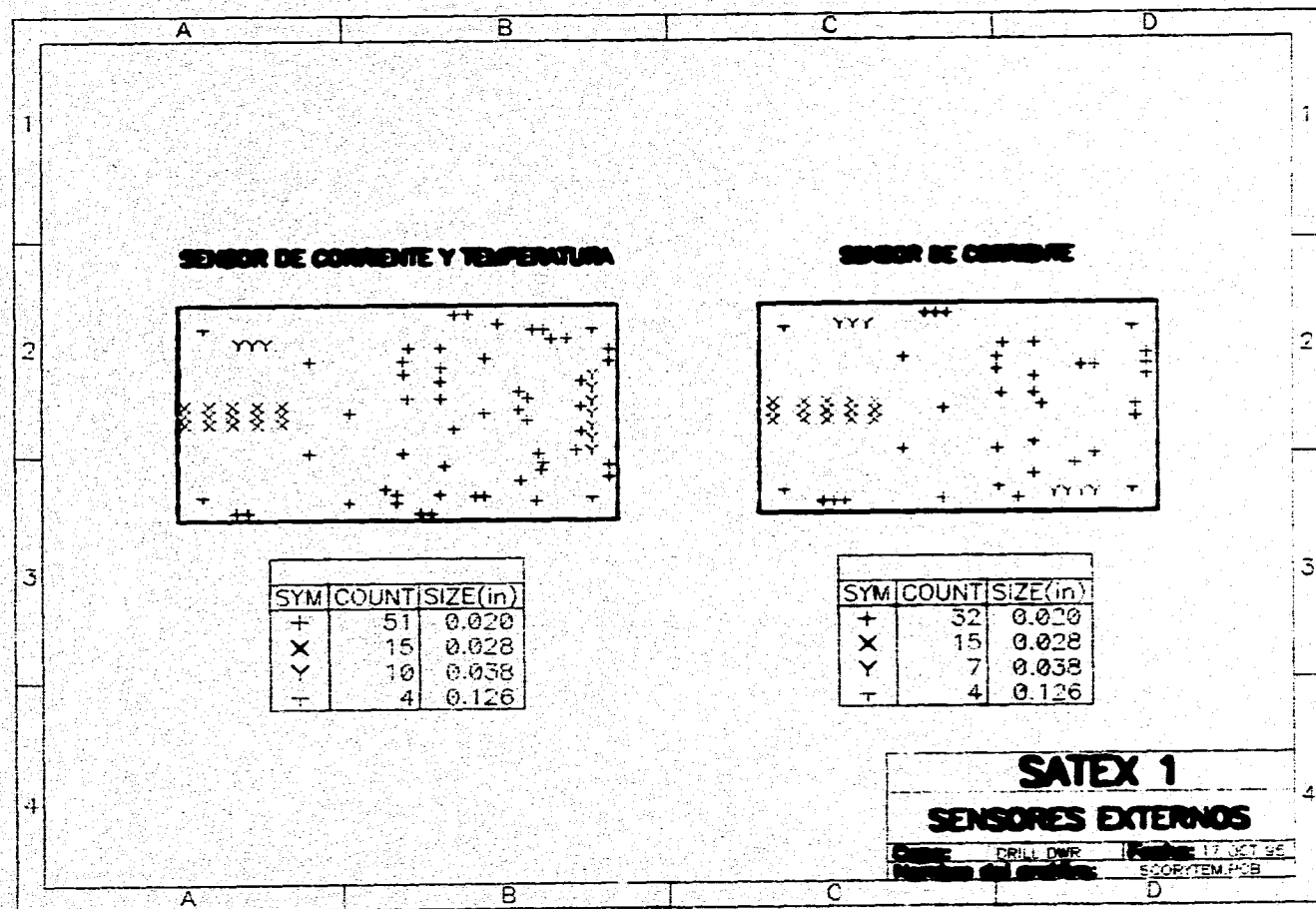
SENSORES EXTERNOS

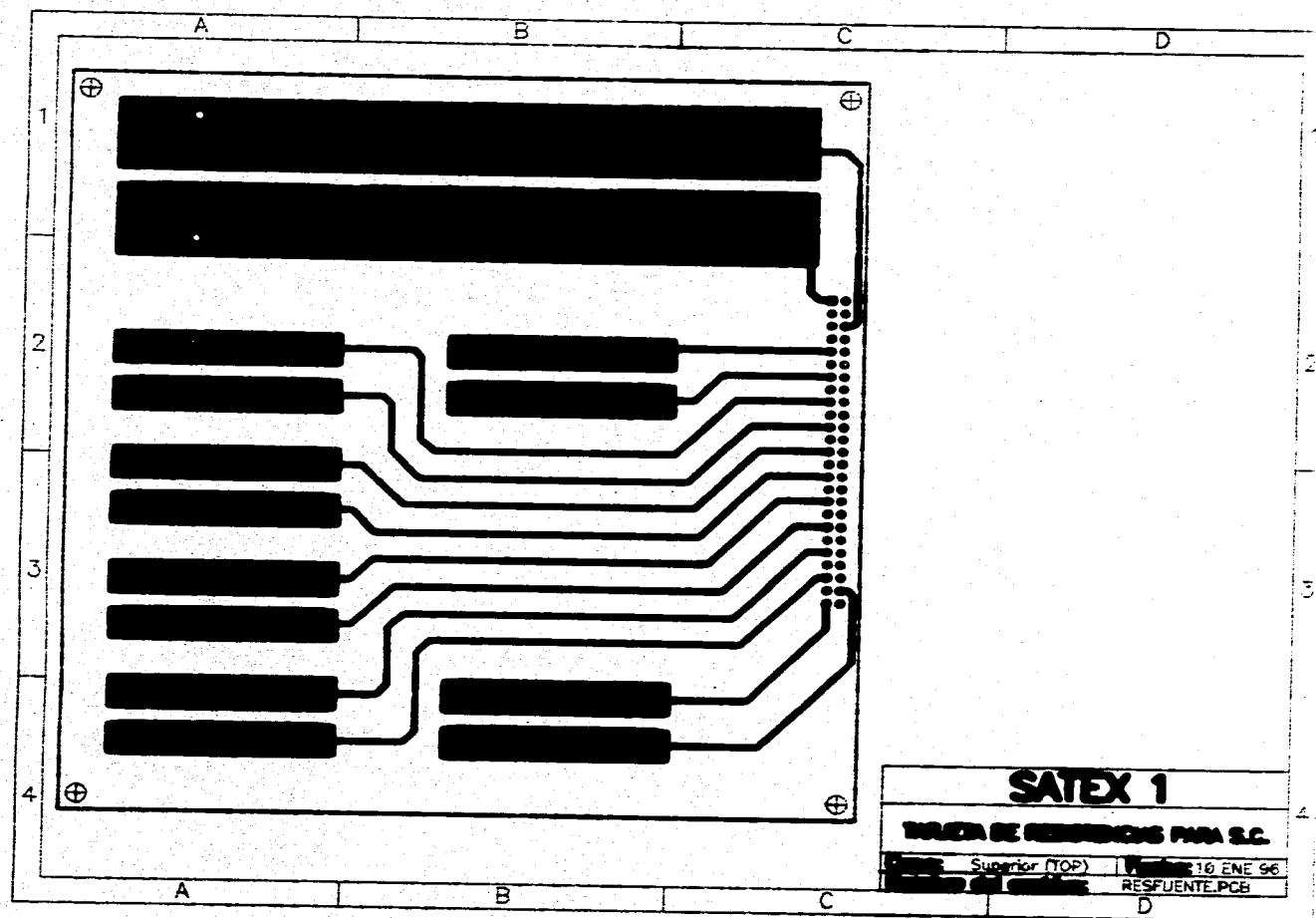
Page: Interior (BOTTOM) | Fecha: 17 OCT 95
 Nombre del archivo: SCORYTEM.PCB

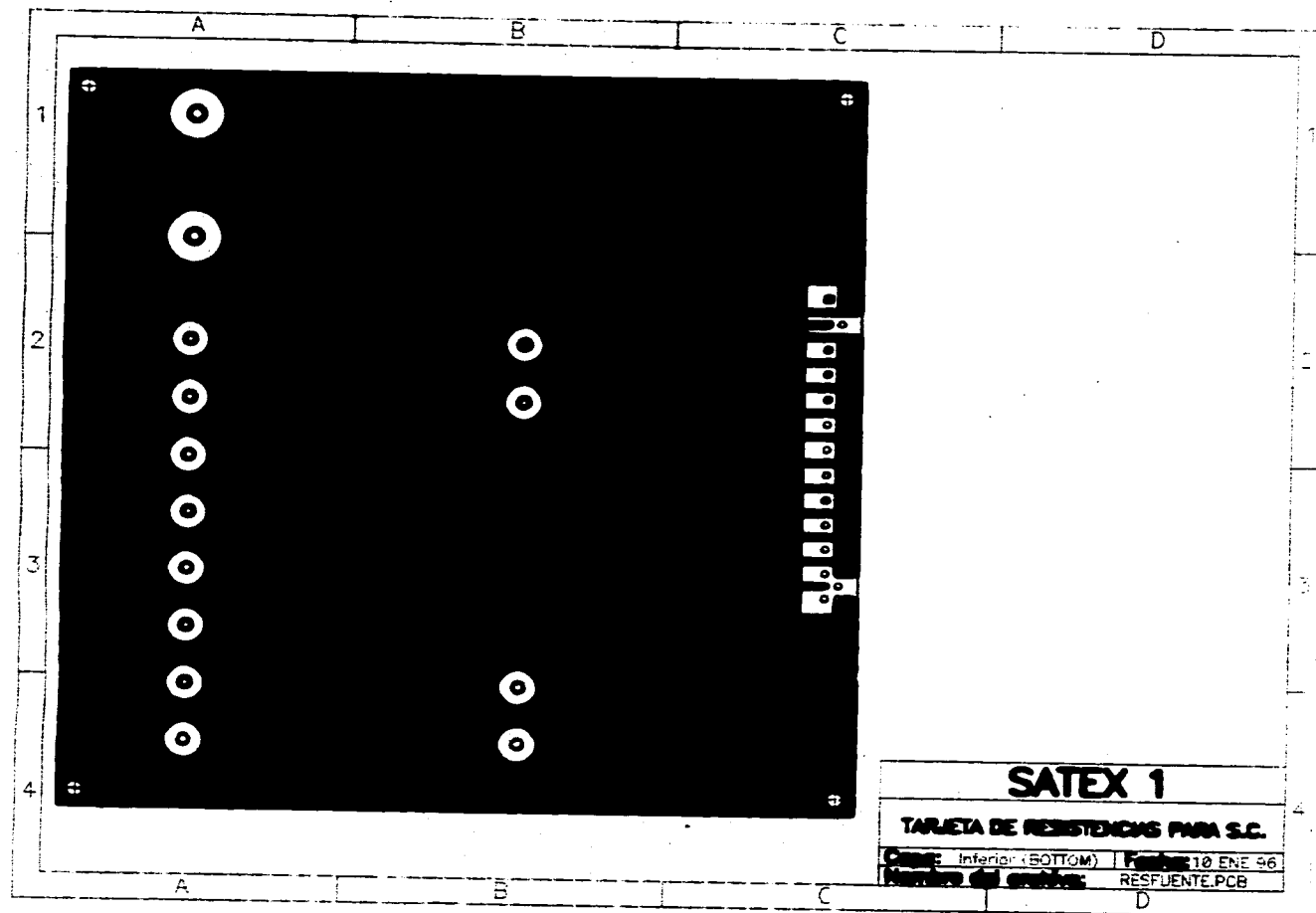


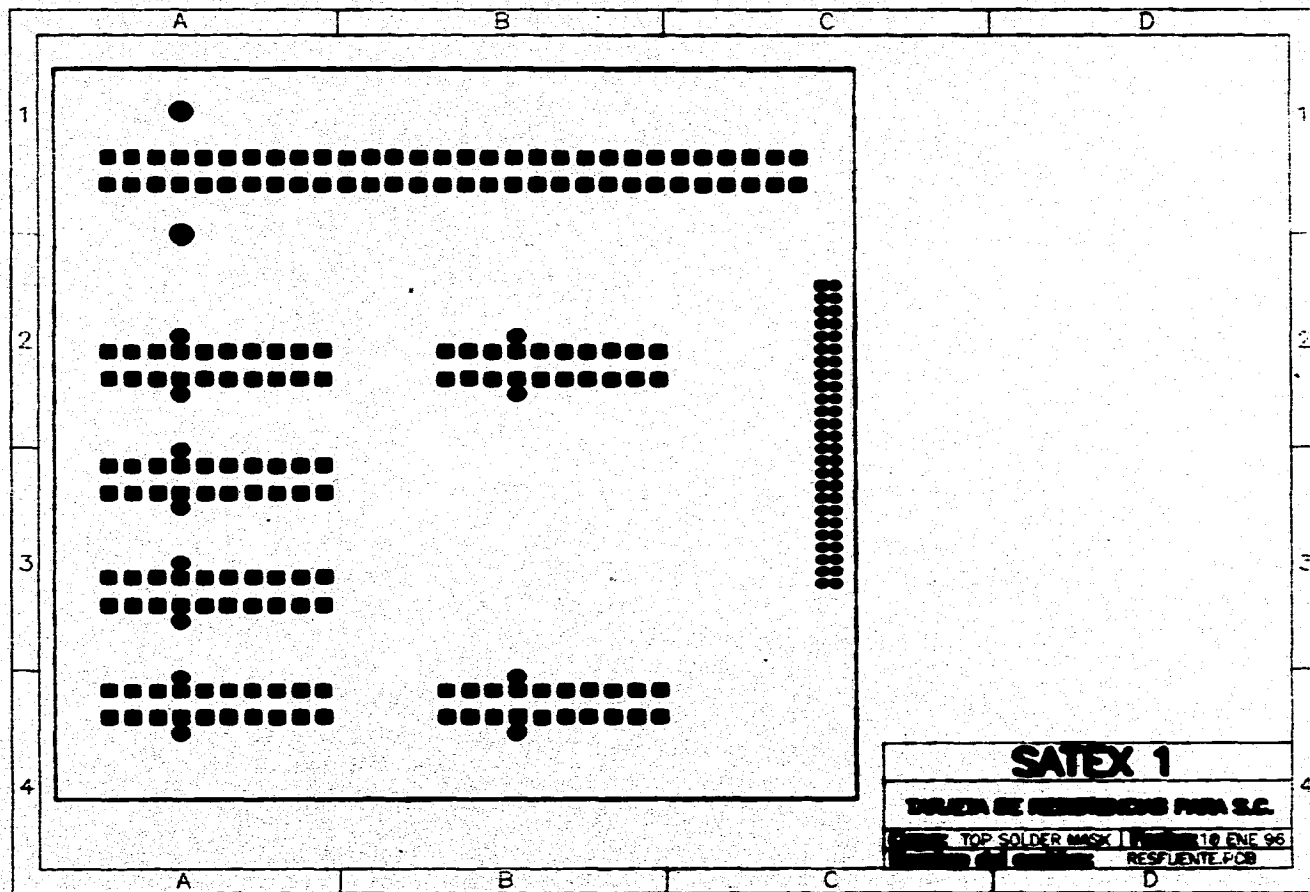


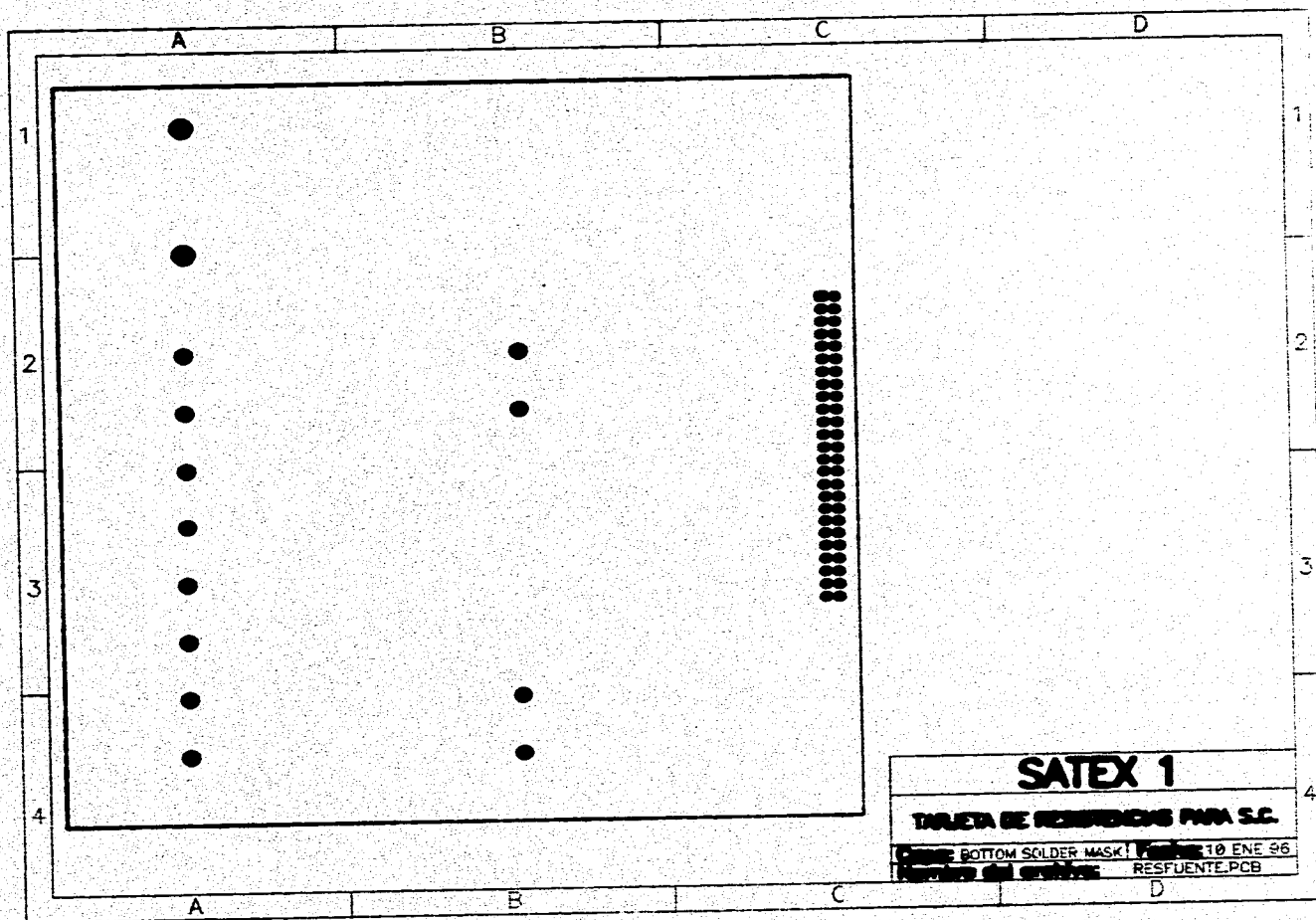


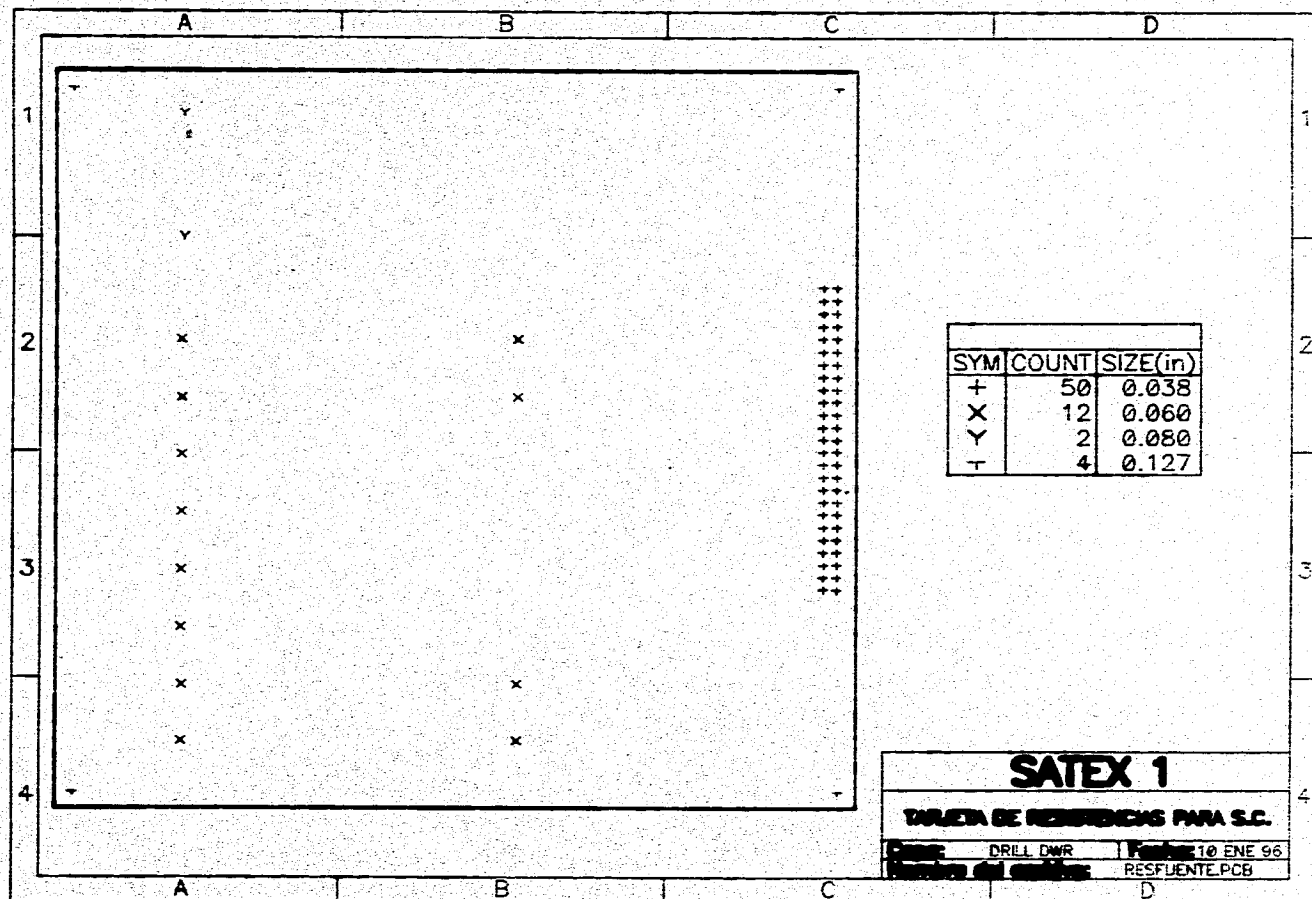


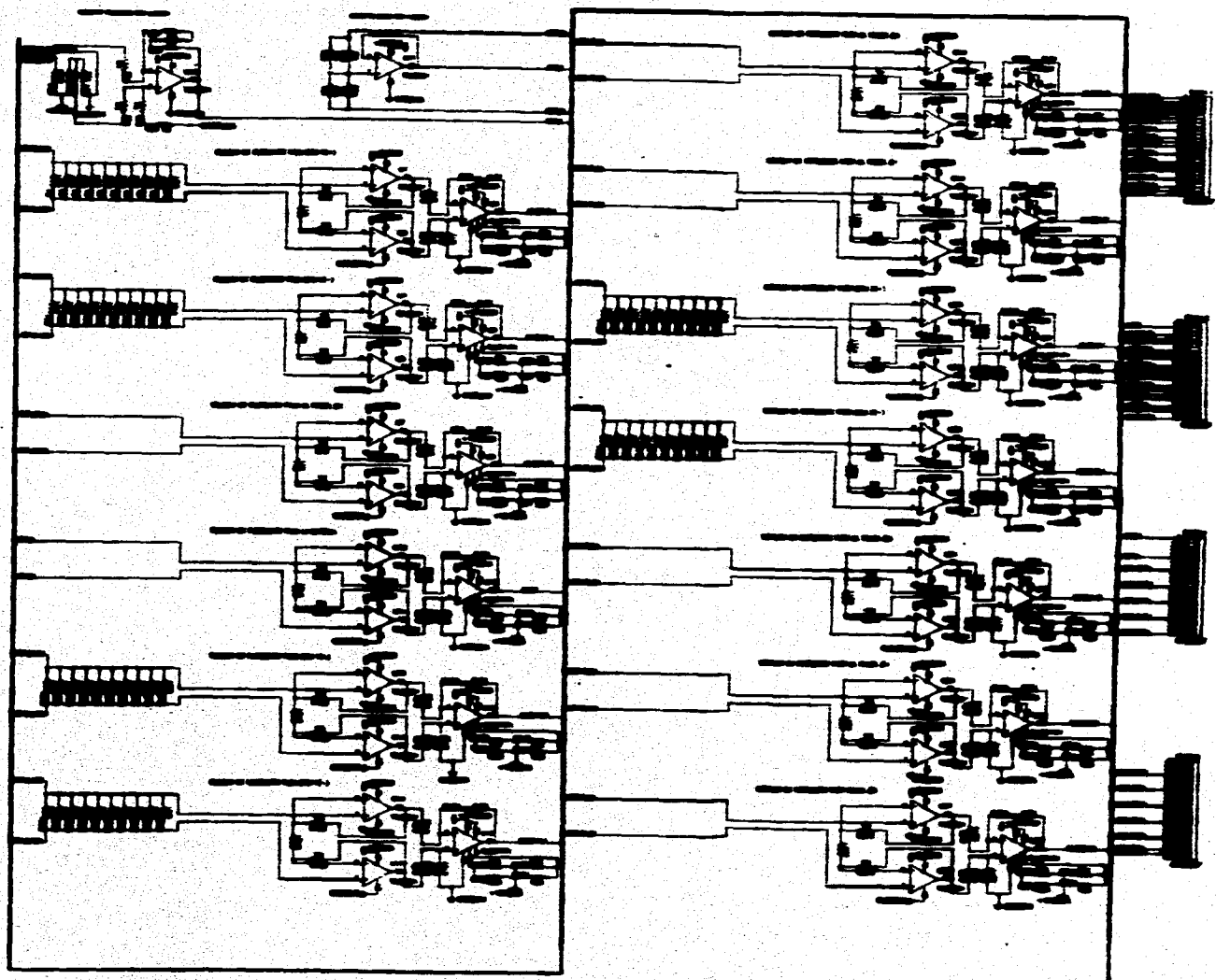


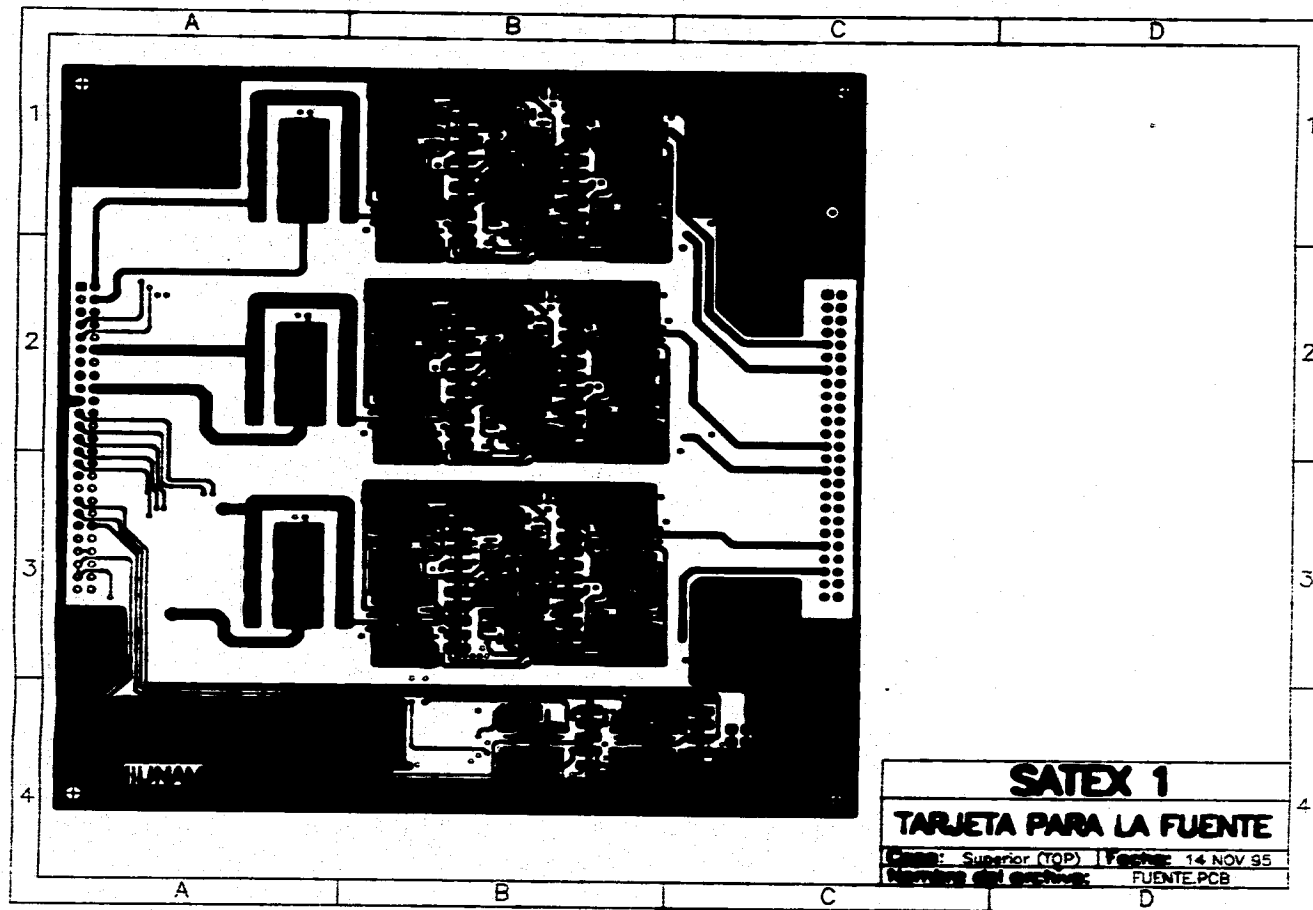


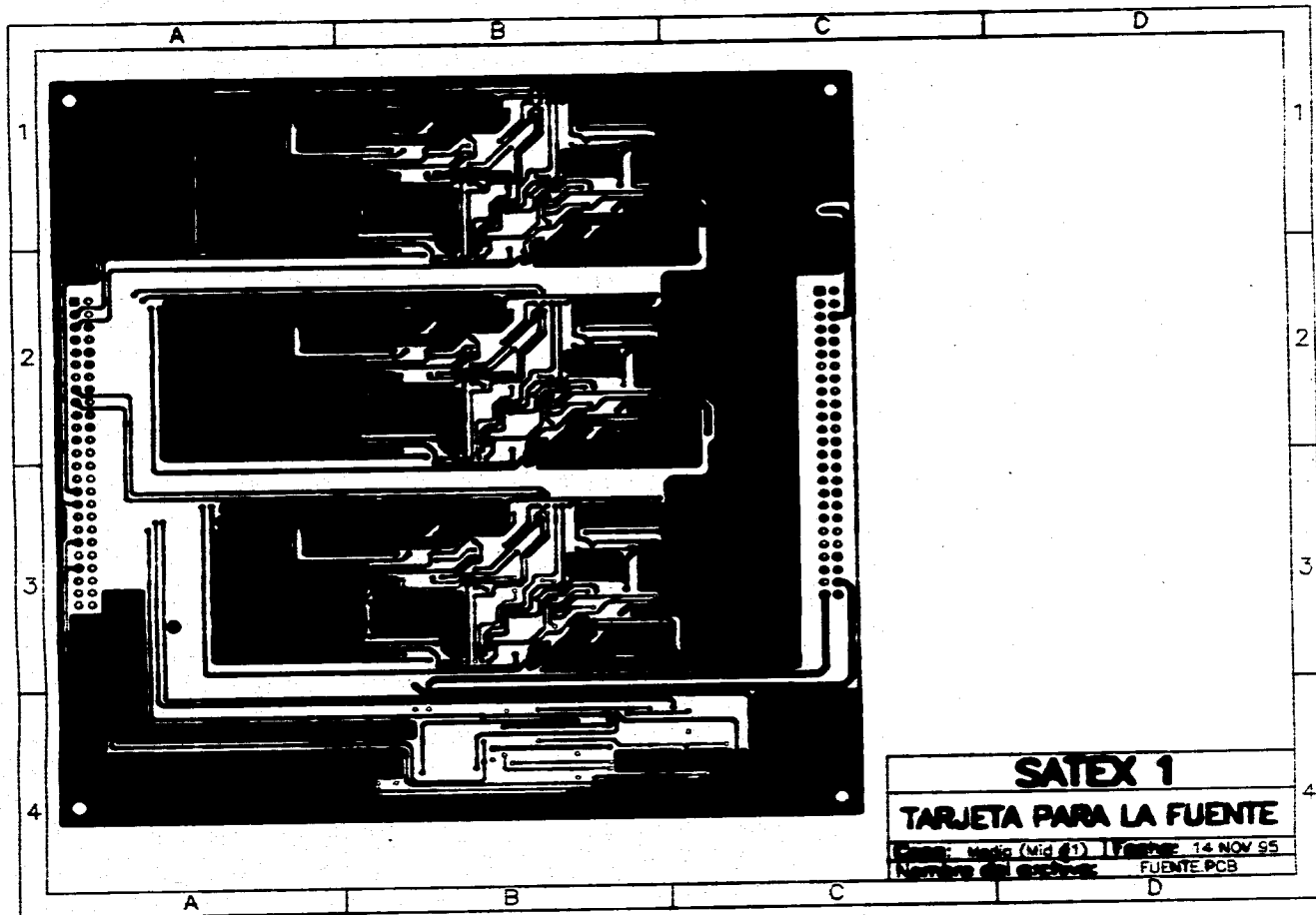


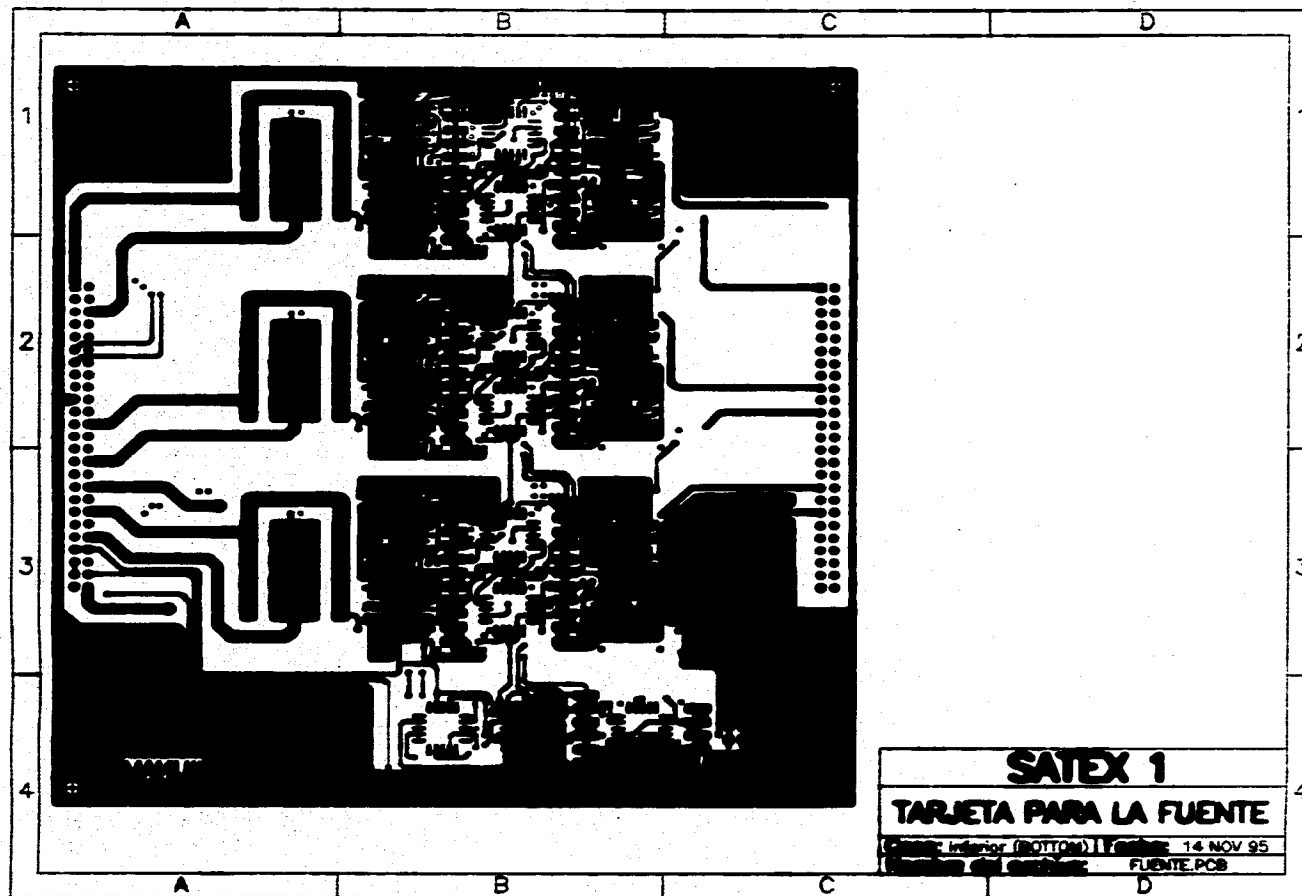


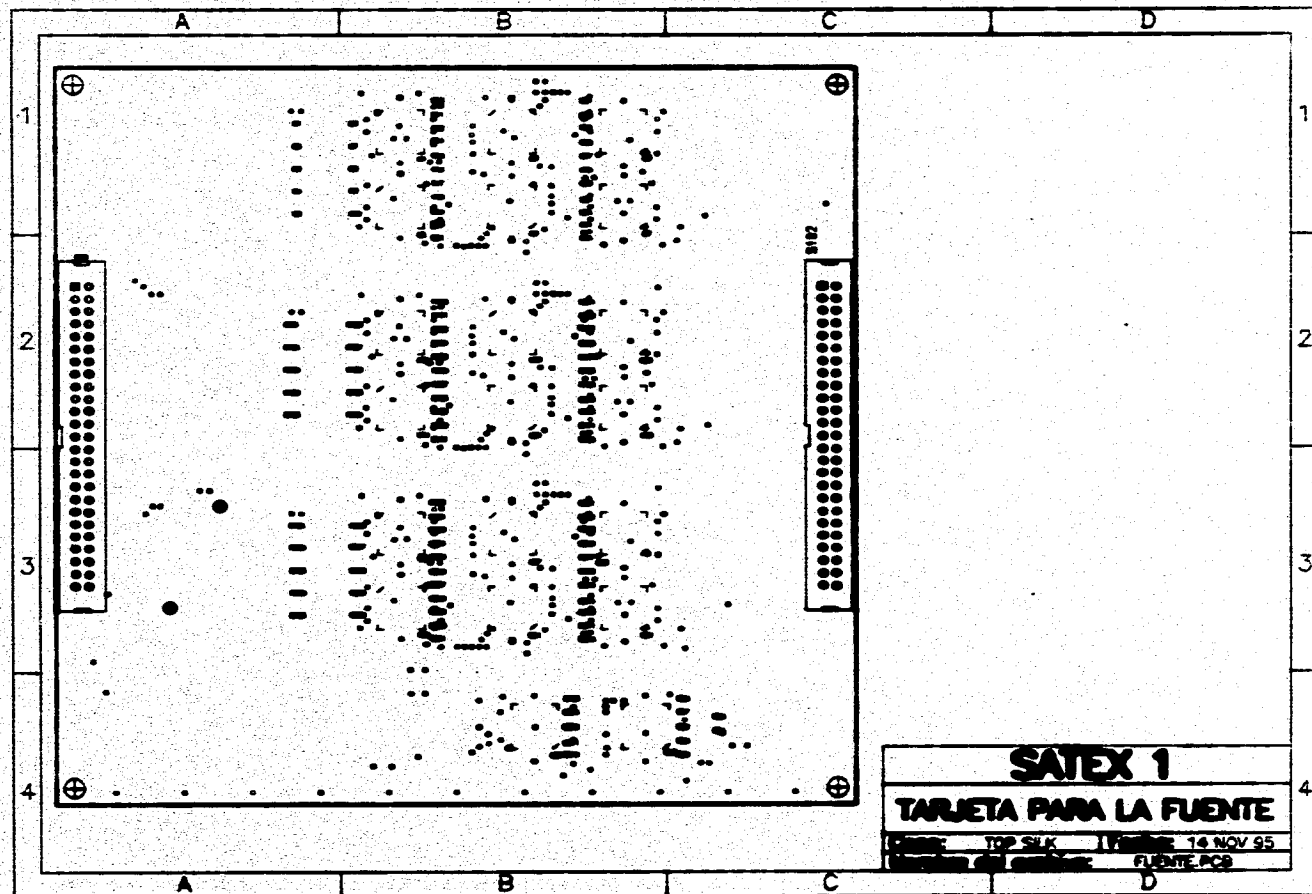


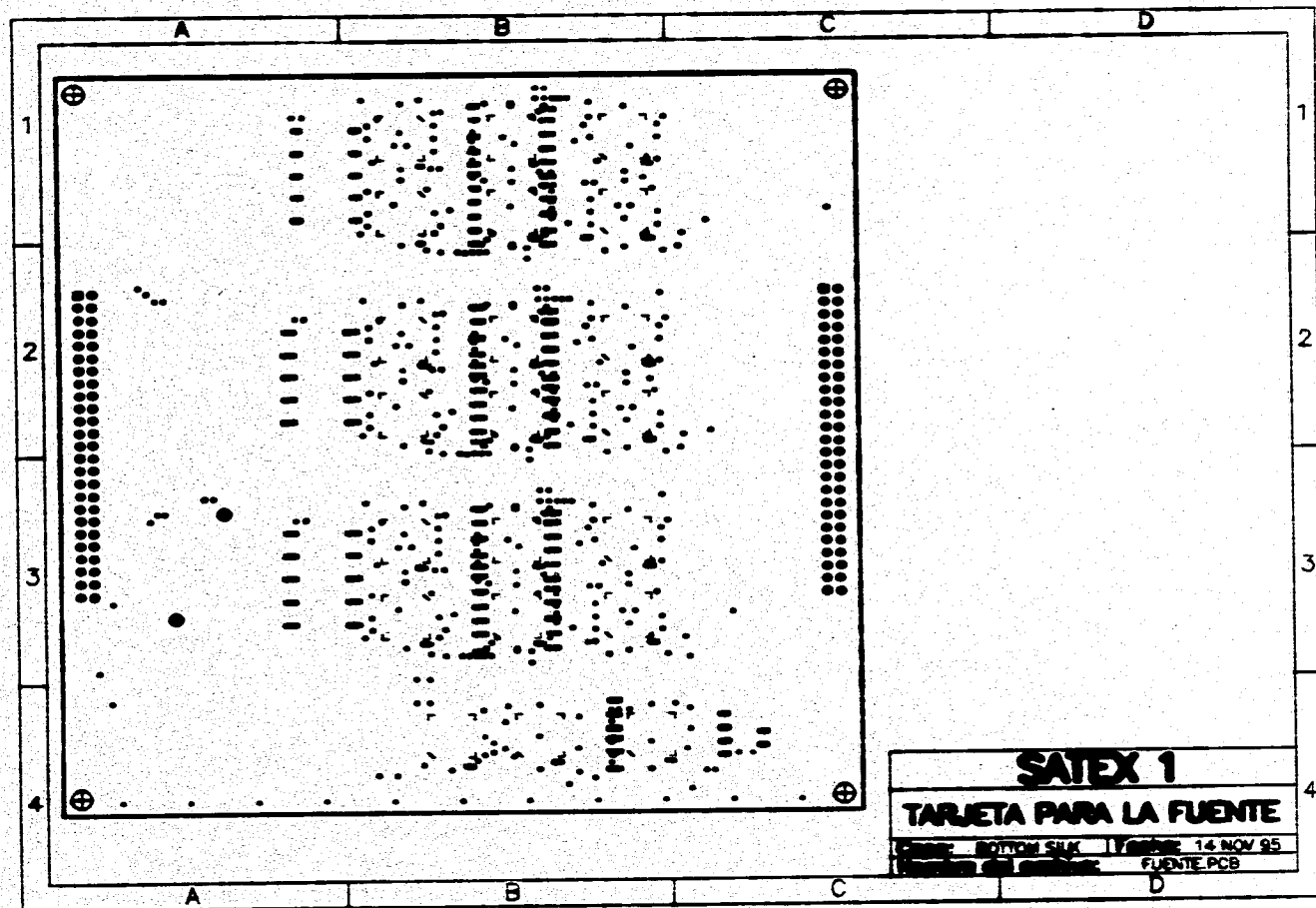


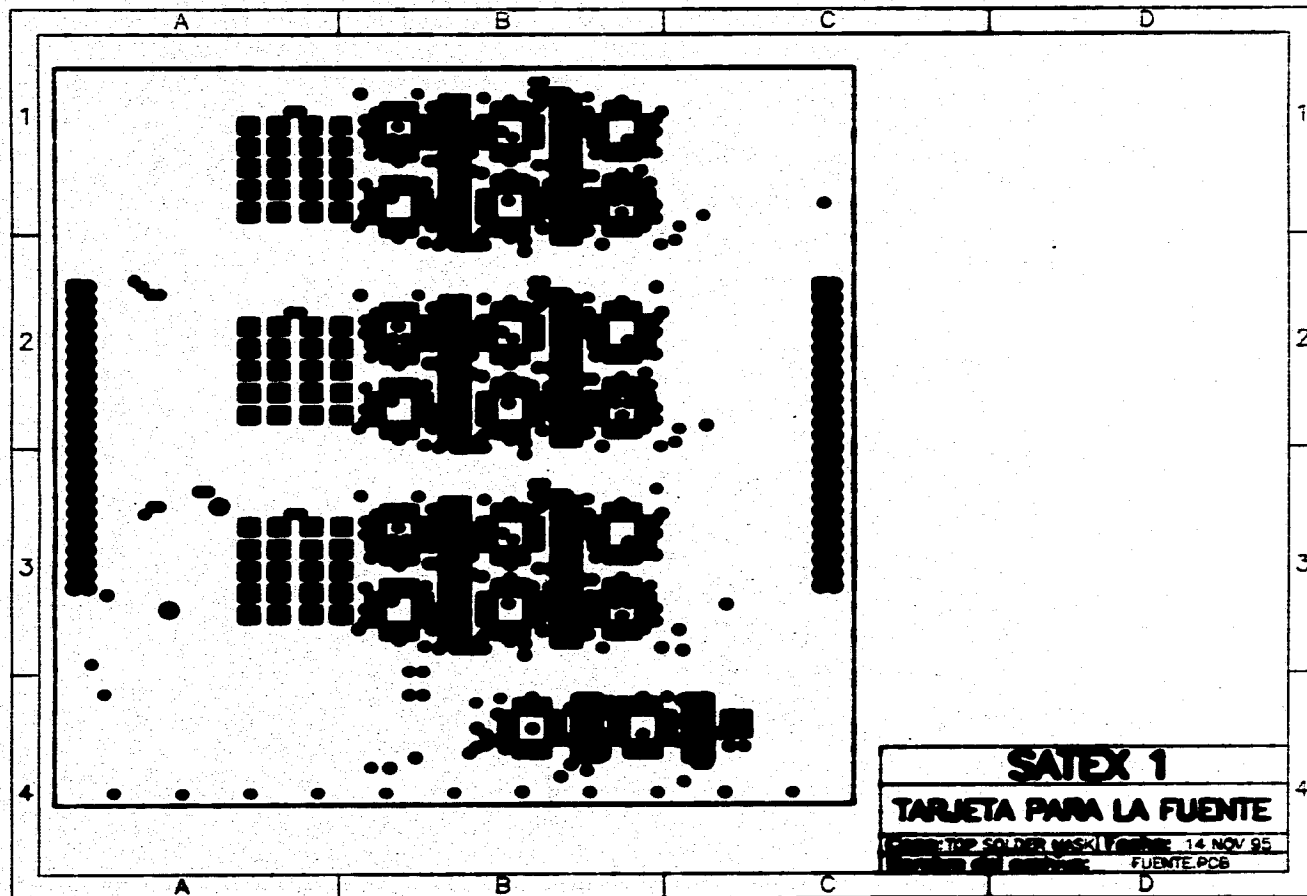


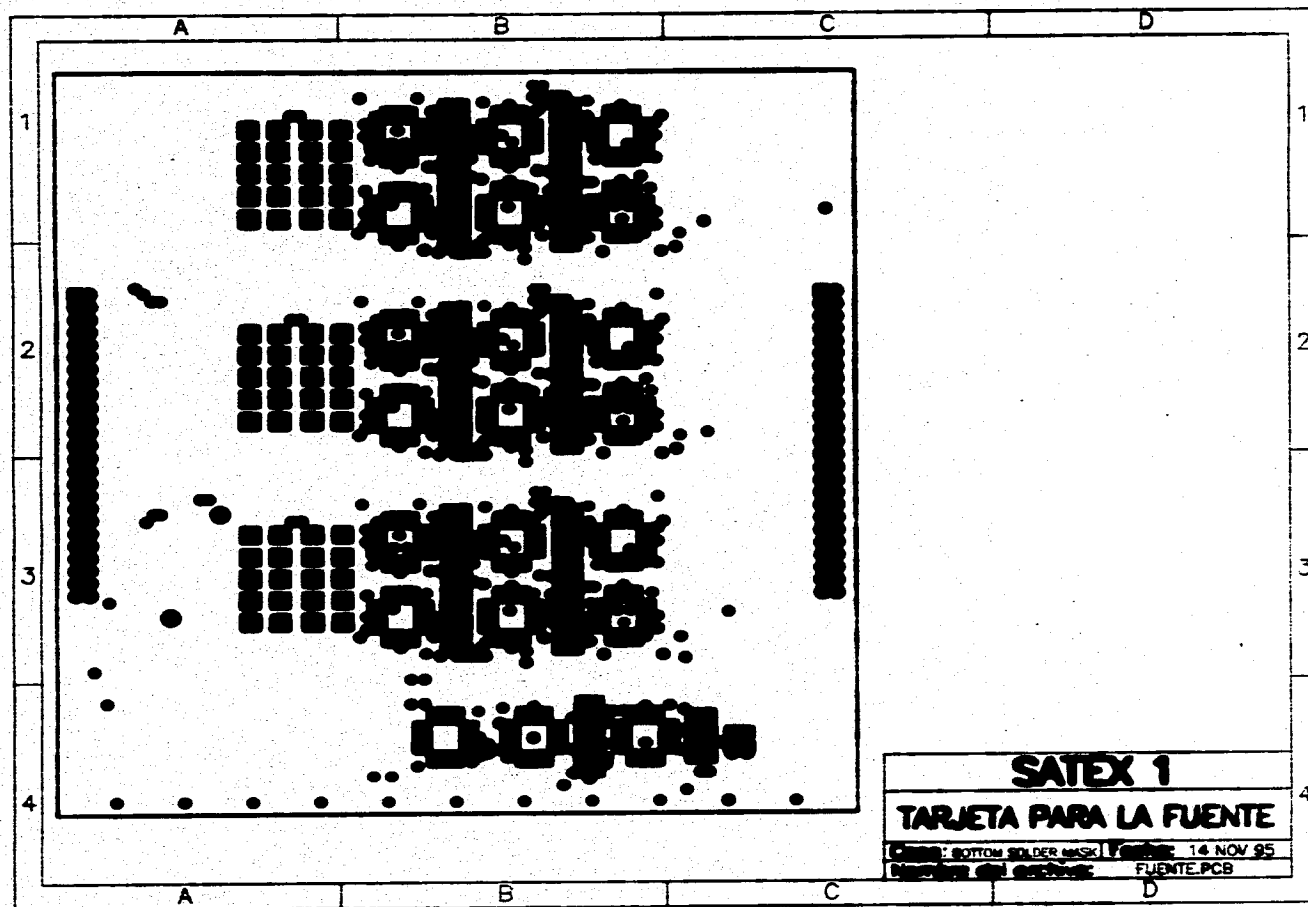


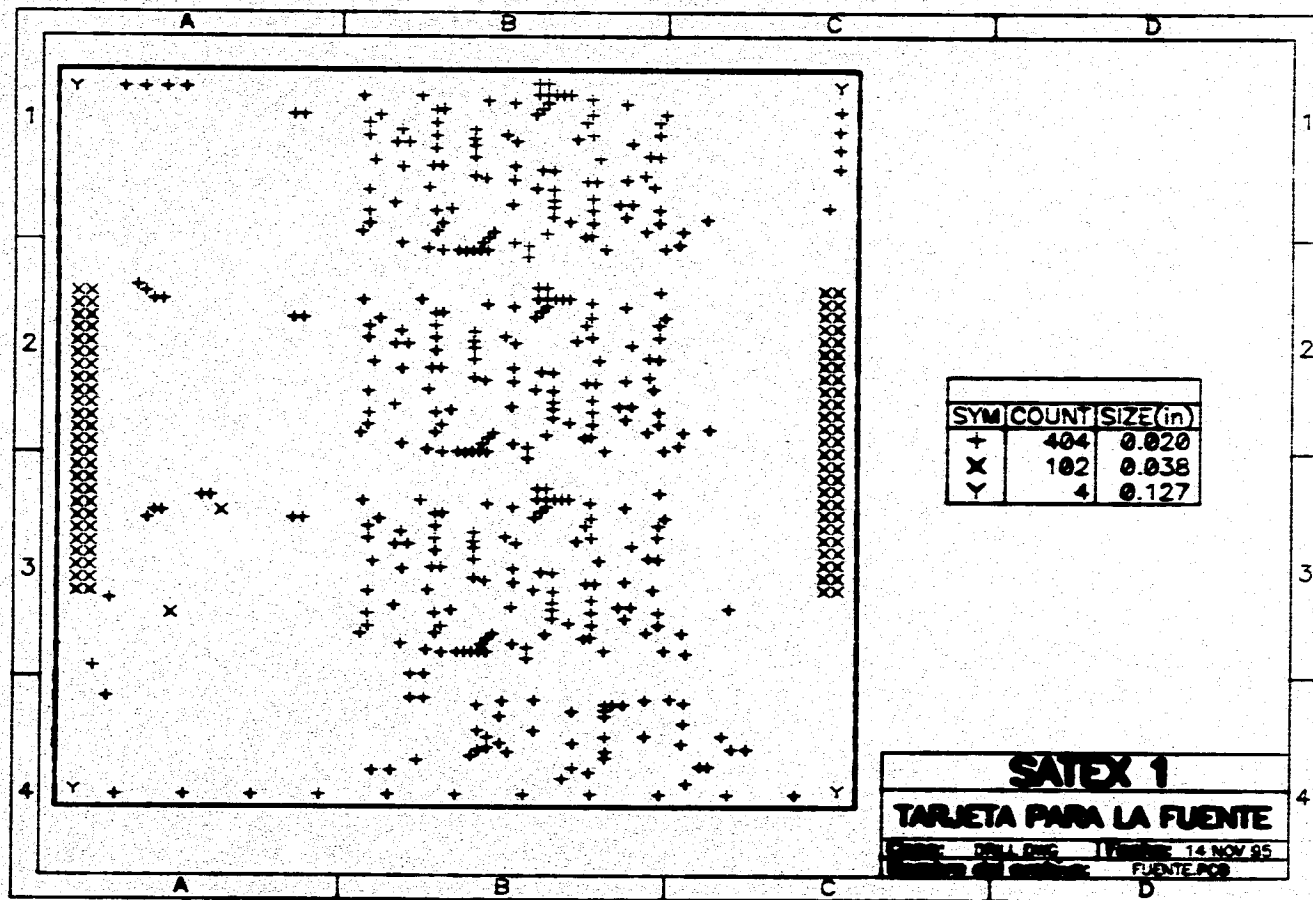












En el siguiente capítulo se describen las pruebas realizadas a la electrónica desarrollada.

PRUEBAS DE VALIDACIÓN

6.1 Introducción

En los capítulos previos se ha descrito el proceso de diseño y desarrollo del teleadquisidor de datos para el microsatélite experimental SATEX 1, el cual está constituido por una computadora y su contraparte redundante, incluye también tres tarjetas adicionales que contienen la electrónica de acondicionamiento de señales de sensores, filtrado, recorte, multiplexaje y el control necesario para que sea posible la conmutación automática de una computadora hacia la otra.

Una vez fabricados los 5 impresos internos del teleadquisidor así como los externos, se continuará con las pruebas finales de validación. En este capítulo se describe con detalle cada una de las fases de validación que deberán ser utilizadas para corroborar completamente la operatividad del teleadquisidor.

Entre estas pruebas son de gran importancia aquellas que se desarrollarán para realizar la calibración final de los sensores del satélite, que son similares a las que se hicieron para la aceptación del diseño de la electrónica de acondicionamiento de los sensores.

En el siguiente y último capítulo se dan las conclusiones y recomendaciones que a juicio del autor constituyen eslabones importantes para mejorar el trabajo desarrollado en esta tesis.

6.2 Pruebas realizadas y por realizar a la tarjeta de conectores

Esta tarjeta contiene los conectores de entrada y salida de señales del teleadquisidor, electrónica de multiplexaje para las señales de sensores, circuitos de filtrado y recorte, y el sensor de temperatura interno.

Las primeras pruebas realizadas a las tarjetas del teleadquisidor fueron aplicadas cuando se culminó la etapa de diseño, estas pruebas son las siguientes y en el orden que se mencionan.

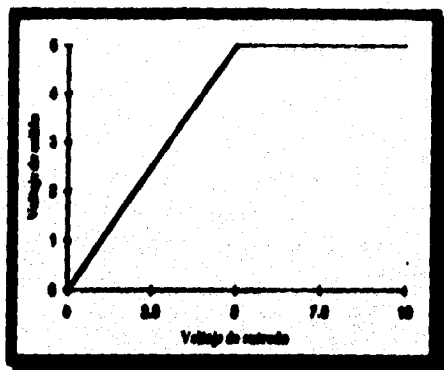
- Con una herramienta de "Tango SCH" [6] se generó un archivo de conexiones del esquemático, posteriormente se imprimió el circuito esquemático y se compararon hasta que estos fueron 100% compatibles.
- Cuando el listado de conexiones de "Tango SCH" fue correcto se generó con "Tango PCB" [7] un listado de conexiones de la tarjeta diseñada y se compararon ambos hasta que coincidieron en el 100% de las conexiones.
- Otra de las herramientas de "Tango PCB" es el "highlight", esta herramienta ilumina toda una conexión de color amarillo resaltándola de las demás. De esta manera es fácil seguir la conexión y revisar los puntos a los que está unida, después de revisar todos los puntos de la conexión ésta es borrada. Este procedimiento se siguió con todas las conexiones de la tarjeta hasta que ésta quedara en blanco. La razón de este procedimiento es el observar si hay conexiones sueltas, es decir que no vayan ni provengan de ningún lado, y así evitar que queden líneas de cobre sueltas. En el caso de que haya un corto entre dos conexiones esta herramienta es útil para localizar el cruce erróneo de las líneas.

Una vez fabricadas las tarjetas se medirá continuidad en puntos críticos como VCC y GND con la finalidad de detectar posibles cortos.

Para la tarjeta de conectores se medirá continuidad de las líneas que van de los conectores de entrada y salida tipo DB's hacia los conectores laterales de la tarjeta (BUS1 Y BUS2). Posteriormente se proseguirá a probar los recortadores.

Con ayuda de una fuente de poder se variarán los voltajes de entrada del recortador los cuales serán medidos con multímetro y con otro similar se medirá la salida de voltaje del mismo. Este procedimiento se realizará para todos los recortadores del teleadquisidor. El comportamiento que deberán seguir los recortadores se muestra en la gráfica 6.1

Debido a que los convertidores A/D de las computadoras de SATEX 1 solo aceptan voltajes positivos de 0 a 5 volts, estos recortadores son una buena protección contra voltajes negativos.



Gráfica 6.1 Comportamiento de los recorridores

Después se proseguirá a validar el comportamiento de los filtros paso bajas que fueron utilizados para eliminar el ruido que pueda tener la señal debido al equipo de comunicaciones del satélite.

Con el generador de señales se colocará a la entrada del filtro una señal senoidal la cual se visualizará con el canal A del osciloscopio y a la salida del filtro se conectará el canal B, después se aumentará la frecuencia de la señal hasta que alcance la frecuencia de corte del filtro, en este punto se medirá la frecuencia de la señal con un frecuencímetro digital y esta lectura será corroborada con el osciloscopio. Este procedimiento será realizado para todos los filtros del teleadquisidor.

Una vez validados los recorridores y los filtros se probarán los multiplexores y por último se probará el sensor de temperatura contenido en esta tarjeta, el procedimiento para la validación de este sensor se explica en la siguiente sección.

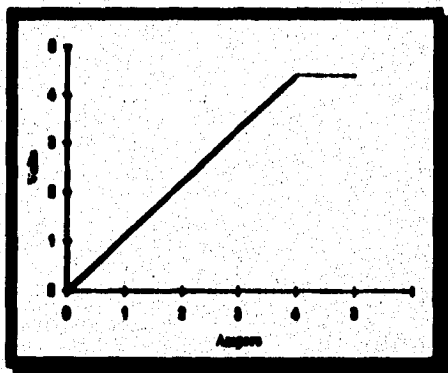
6.3 Pruebas realizadas y por realizar a la tarjeta de sensores

En la sección 5.5 de la presente tesis se describió el diseño y contenido de esta tarjeta, la cual contiene acondicionamiento para 6 sensores de corriente, 4 de temperatura, 2 magnetómetros triaxiales y 2 sensores finos de sol biaxiales (lo referente a la electrónica de acondicionamiento diseñada y utilizada para estos sensores se presentó en el capítulo 4), además contiene electrónica de multiplexaje, filtrado y recorte. Las pruebas que se realizaron y las que deberán ser realizadas a esta tarjeta se explican a continuación.

Una vez que se terminó el diseño del circuito impreso de esta tarjeta se le realizaron las pruebas descritas en el punto 6.2 para verificar el diseño. Una vez que se fabricó y debido a que contiene dos submódulos electrónicos que se energizan por separado (electrónica de sensores y electrónica de magnetómetros) la tarjeta se revisó para corroborar que no tuviera corto entre polarizaciones. Posteriormente se probarán los recortadores y filtros de la misma forma que se hará con la tarjeta de conectores, y por último, se realizarán pruebas a la electrónica de sensores y multiplexores.

Para probar los sensores de corriente, se tomó como herramienta un potenciómetro de potencia conectado en serie a una fuente de voltaje para poder tener un rango de corriente variable, el éste fue medido con el sensor diseñado y corroborado con un multímetro digital.

La corriente se fue variando según el intervalo para el cual fue diseñado cada sensor y se midió el voltaje de salida de la electrónica de acondicionamiento. Este procedimiento será realizado para todos los sensores del teleadquisidor y de SATEX 1 que faltan por validar. La gráfica 6.2 muestra el comportamiento de uno de estos sensores.



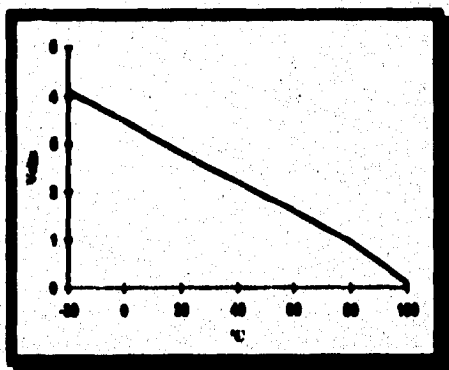
Gráfica 6.2 Caracterización del sensor de corriente

Como se mencionó en la sección 4.3 el sensor de temperatura es un termistor. Antes de realizar las pruebas a la electrónica de acondicionamiento de estos sensores, se optó por caracterizar todos los termistores (18) y a etiquetarlos con un número. Los termistores se colocaron en un recipiente lleno de agua, con ayuda de una perilla se empezó a calentar el agua midiéndole su temperatura con un termómetro digital, al mismo tiempo se estuvo midiendo con 3 multímetros la resistencia eléctrica de 3 termistores. Las pruebas se efectuaron en el intervalo de 15 a 85°C. Posteriormente para alcanzar temperaturas de 15°C a 0°C se agregaron hielos al recipiente con agua y se fueron tomando lecturas de los

termistores. Por último, para temperaturas menores a cero (hasta -19°C) los termistores se instalaron en el congelador de un refrigerador operándolo a su máxima capacidad de enfriamiento. Este procedimiento fue repetido 6 veces para caracterizar a todos los termistores.

- Con base en los resultados obtenidos, se pueden realizar pruebas a la electrónica de acondicionamiento con un potenciómetro en lugar del termistor, debido a que es más fácil y rápido variar la resistencia del potenciómetro.

Para validar la electrónica de acondicionamiento de este sensor se variará el potenciómetro simulando la variación de temperaturas y se medirá la salida de voltaje de la señal ya acondicionada, la siguiente gráfica nos muestra la relación de voltaje contra temperatura.



Gráfica 6.3 Caracterización del sensor de temperatura

Para los sensores de campo magnético hubo dos retos que enfrentar, el primero para generar un campo magnético variable el cual pueda ser controlado, y el segundo aislar el sensor del campo magnético terrestre.

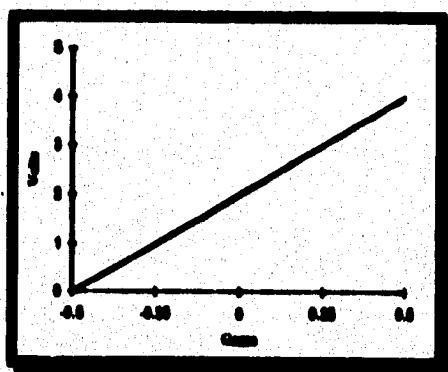
Para vencer el primer reto se construyó una bobina circular de 25 cm de longitud y 3.5 cm de ancho aproximadamente, a la cual se le hizo pasar una corriente, de esta forma se generó un campo magnético en función de la corriente eléctrica.

Para aislar el sensor del campo magnético terrestre se solicitó apoyo al Instituto de Geofísica de la UNAM para usar sus instalaciones. El equipo utilizado consta de 3 tubos de material μ (uno dentro de otro y estos dos dentro de un tercero). Este material tiene la característica de ser un excelente conductor de campo magnético, de esta forma las líneas de campo magnético son conducidas

por las superficies de los tubos quedando el interior de estos aislado del campo magnético terrestre.

Se tomó el magnetómetro a validar y junto con otro de referencia del Instituto de Geofísica se insertaron en el interior de la bobina, después la bobina se puso en el interior de los tubos descritos. Posteriormente se energizó la bobina y con un multímetro se fue midiendo la salida de voltaje del magnetómetro a validar y se comparó con la lectura del equipo prestado.

Una vez obtenido el comportamiento del magnetómetro se prosiguió a validar su electrónica de acondicionamiento, para esto, en vez de conectar el magnetómetro se simuló sus voltajes de salida con una fuente y con ayuda de un multímetro se observó la salida de voltaje de la electrónica de acondicionamiento. La gráfica 6.4 muestra la salida de voltaje de la electrónica de acondicionamiento contra el campo magnético.



Gráfica 6.4 Caracterización del sensor de campo magnético

6.4 Pruebas realizadas y por realizar a la tarjeta de control y multiplexaje

Como se explicó en el capítulo 5 la tarjeta de control contiene las electrónicas de control, de bobinas de torque magnético y electrónica siempre encendida, además tiene parte de la electrónica de sensores y magnetómetros, debido a esto, las pruebas realizadas a esta tarjeta consistirán en corroborar su correcto funcionamiento. Un punto importante fue el asegurar en el diseño del Impres que los multiplexores que canalizan la información hacia los computadores principal y redundante accionaran todas las líneas a una sola computadora a la vez.

6.5 Pruebas realizadas y por realizar a la computadora

Como se describió en el capítulo 3, la estrategia aplicada para dar solución a los problemas de computo en SATEX 1 consideró por un lado la utilización de una tarjeta de desarrollo comercial para elaborar el software del satélite, y por otro realizar el diseño personalizado y de calificación militar de las tarjetas del microsatélite. Como también se mencionó, al inicio del proyecto se dedicó tiempo especial para estudiar y conocer de manera amplia todos los aspectos relacionados con los periféricos de la tarjeta comercial, los cuales habrían de ser 100% compatibles con los de la computadora de vuelo.

Por esta razón a la versión final en circuito impreso, de la computadora de vuelo se aplicarán los mismos procedimientos de programación desarrollados para la tarjeta comercial [3], de esta manera se logrará un rápido avance en la fase de validación de la computadora de vuelo. Entre las primeras pruebas a realizar estarán aquellas relacionadas con el uso y control de temporizadores, interrupciones, puertos serie, líneas I/O, convertidor A/D y modos de bajo consumo de potencia. Los listados del software utilizado en la tarjeta comercial y que servirán para la validación de la tarjeta de vuelo se presentan en el apéndice de [3]. Una vez verificada la operación correcta de los periféricos de la computadora de vuelo se procederá a correr el programa de control global del SATEX 1, el cual se validó funcionalmente con el sistema de desarrollo comercial, para esto se dará seguimiento a las diferentes rutas de tránsito en las que puede incurrir el programa de control del vehículo. En esta etapa de validación se utilizará también una pequeña tarjeta que simula la operación de sensores del satélite y que a su vez permite observar por medio de LED's de color el encendido y el apagado de las cargas eléctricas del microsatélite. Esta interfaz, aunque muy sencilla permitirá observar el estado de los sensores para navegar de manera coordinada y sencilla entre las diversas rutas del software desarrollado (ver figura 6.1).

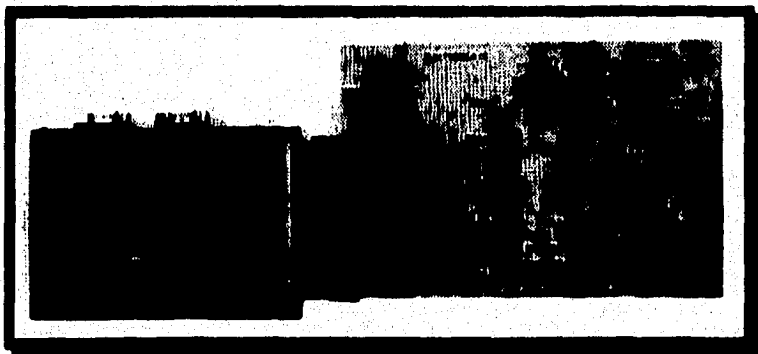


Figura 6.1 Interfaz realizada y tarjeta de la microcomputadora comercial

6.6 pruebas de integración

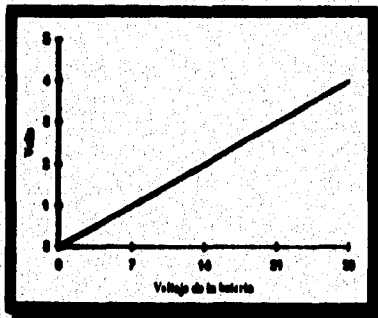
Una vez probados las 5 tarjetas del teleadquisidor para SATEx 1 se iniciará el ensamble en tandem de las mismas para realizar las pruebas finales de operación del teleadquisidor. Estas pruebas consistirán en detectar posibles cortos entre dos o mas tarjetas, entre entradas y salidas de señales y por último entre líneas de comunicación con otros submódulos del SATEx 1.

Debe destacarse también que durante estas pruebas se mantendrá comunicación continua entre la computadora de vuelo del teleadquisidor y una computadora personal que hará las veces de estación terrena. De esta forma también se validará el correcto funcionamiento de los protocolos de comunicación entre satélite y tierra. Esta serie de pruebas se realizarán en repetidas ocasiones para detectar fallas operativas, en caso de que éstas existan. Para validar con mayor veracidad el teleadquisidor, se encuentre en fase de planeación, el desarrollo de pruebas prolongadas de funcionamiento, las cuales se llevarán a cabo hasta por semanas de operación continua, también se realizan los preparativos para pruebas de vibración y termovacio para calificar el equipo para vuelo espacial.

6.7 Pruebas realizadas y por realizar a los módulos externos del teleadquisidor

Debido a que el funcionamiento de la electrónica de los circuitos impresos externos al teleadquisidor es similar a la de los sensores que van en el interior de éste, las pruebas realizadas y por realizar son las mismas de la tarjeta de sensores.

El único sensor diferente es el sensor de voltaje cuyo funcionamiento se muestra en la gráfica 6.5.



Gráfica 6.5 Caracterización del sensor de voltaje

En el siguiente y último capítulo, se presentan las conclusiones y recomendaciones que emanan de la presente tesis.

7.1 Conclusiones

Del trabajo expuesto, emanan las siguientes conclusiones:

Se diseñó completamente el teleadquisidor para SATEX 1 con especificaciones para vuelo espacial de órbita baja (800 Km).

Todos los componentes del teleadquisidor a excepción del microcontrolador son de calificación militar. El microcontrolador es de rango de temperatura extendido y de tecnología CMOS. Según experiencias de otros proyectos similares la tecnología CMOS soporta los niveles de radiación de órbita baja.

Una vez que fue seleccionada la tarjeta de la computadora, se decidió diseñar el teleadquisidor con circuitos impresos acoplados en tandem, por esta razón las dimensiones de los otros circuitos impresos que se diseñaron se ajustaron a las dimensiones de la tarjeta de la computadora. Para ahorrar espacio y peso se decidió utilizar componentes de montaje superficial y diseñar circuitos impresos con componentes en ambas caras, esto obligó la fabricación de circuitos impresos de tres conocidos también como circuitos impresos multicapa.

En vista de que en México no se fabrican prototipos de circuitos impresos multicapa, se pidieron cotizaciones a Estados Unidos. Como estas resultaron muy costosas se optó por realizar prototipos artesanales en México.

Una vez validados se fabricarán los impresos finales en el extranjero con la seguridad de que no presentarán errores.

Debido a que los componentes del teleadquisidor deberían de ser de calificación militar, antes de realizar los diseños se identificaron cuales componentes existían en versión comercial y militar. Posteriormente se realizaron los pedidos los cuales tienen tiempos de entrega muy largos. El tiempo de espera se aprovechó para efectuar pruebas con los componentes de calificación comercial.

Las pruebas realizadas a la electrónica de acondicionamiento de los sensores con componentes comerciales son las mismas que se utilizarán para validar la electrónica de los circuitos impresos del teleadquisidor.

La utilización de componentes de montaje superficial permitió la reducción de las dimensiones del teleadquisidor de 3 a 4 veces del tamaño que hubiese presentado con el uso de componentes comerciales.

7.3 Recomendaciones

Algunas de las recomendaciones que se pueden dar para la utilización o la mejora del trabajo desarrollado, son las siguientes.

El teleadquisidor desarrollado puede servir también para aplicaciones industriales, su costo se reduce con el uso de componentes de calificación industrial o comercial.

En caso de requerirse más entradas para sensores, los cuatro multiplexores de 4 a 1 se pueden cambiar por multiplexores de 8 a 1. Esto traería como consecuencia una pequeña modificación en el diseño de los dos primeros impresos del teleadquisidor (tarjeta de conectores y tarjeta de sensores).

Si se pudiera encontrar algún circuito integrado que integre completamente a un amplificador de instrumentación se reducirían los componentes utilizados y la complejidad de algunos impresos, además debido a que estos amplificadores de instrumentación ya vienen probados de fábrica las pruebas de validación de los sensores de corriente serían más rápidas.

Si se quisiera reducir aun más el tamaño del teleadquisidor, se recomienda ampliamente el diseño de ASIC's híbridos, con los cuales cada tarjeta podría remplazarse incluso con un solo circuito integrado de tamaño proporcional al número de líneas de entrada y salida requeridas.

Si el punto anterior se llevará a la práctica, sin lugar a dudas el teleadquisidor tendría grandes probabilidades de éxito a nivel comercial (industrial).

Si se requiriera la fabricación de este tipo de tarjetas por volumen, se recomienda no soldar los componentes con cautín. Así mismo se recomienda pedir las máscaras de antisoldado de buena calidad para que permita el soldado en cámaras de alta temperatura sin que a ésta le afecte y de esta forma el producto tenga una mejor presentación.

REFERENCIAS

1. Herrmann "Small Spacecraft Applications for Future Science Missions" Conference on Small Satellites, UTHA State University, September 13-16 1993
2. Walter L. Morgan, Gary D. Communications Satellites Handbook, tercera edición, Mc Graw Hill, 1988.
3. Galdino Gutierrez Perez, Martin Juez Hernandez. Red de comunicaciones y programación global de las computadoras del microsatélite SATEX 1, México D.F. Ciudad universitaria 1996,
4. Siemens User's Manual Microcontroller SAB80C165, 1990,, edition 6.90.
5. Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll, Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, Prentice Hall 1993, cuarta edición.
6. Reference Manual "Tango Schematic", 1989, 90 ACCEL Technologies, Inc.
7. Reference Manual "Tango PCB PLUS", 1989, 90 ACCEL Technologies, Inc.
8. Reference Manual "Tango Route PLUS", 1989, 90 ACCEL Technologies, Inc.
9. Gerald L. Ginsberg, Printed Circuits Design, 1991 Mc Graw Hill,,