

39
21



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**"ANÁLISIS, SELECCIÓN, DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE IMÁGENES
DIGITALES PARA ASTROFOTOGRAFÍA"**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIEROS EN COMPUTACIÓN
P R E S E N T A N :
**ENRIQUEZ GARCÍA AMÉRICA DEL PILAR
RAMÍREZ ROMERO ALEJANDRO**

DIRECTOR DE TESIS: ING. JUAN CARLOS LOPEZ SANCHEZ
CO-DIRECTOR DE TESIS: ING. MARICELA CASTAREDA PERDOMO



MEXICO, D. F.

1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Análisis, selección, diseño y construcción de una cámara de imágenes digitales para Astrofotografía.

Agradecimientos

Queremos agradecer a:

Nuestros padres:

Dr. Eusebio Enriquez Ceja

Sra. Raquel García Solorio

y

Sr. Gregorio Ramírez Montaña.

Sra. María de la Luz Romero León

a quienes reiteramos nuestro amor y dedicamos este trabajo como una humilde respuesta a todo el esfuerzo incondicional que nos han brindado durante toda nuestra vida. Gracias.

Nuestros hermanos:

David, Raquel, Reyna Eugenia y Carolina

y

Marcada y Gerardo.

de quienes siempre hemos recibido un cariño armonioso .

Nuestras hijas:

*América y Alejandra que son los motores que impulsan
nuestros esfuerzos.*

Al Ing. Juan Carlos López Sánchez.

Al Ing. Maricela Castañeda Perdomo.

por su gran ayuda y apoyo.

América y Alejandro.

INDICE

Introducción	i
1. Tecnología de un detector de imágenes CCD	1
1.1 Qué es un detector de imágenes CCD	2
1.1.1 Origen del detector CCD	2
1.1.2 El Capacitor MOS	2
1.1.3 Detector de imagen tipo lineal	5
1.1.4 Detector de imagen tipo matriz	6
1.1.5 Transferencia de interlíneas	7
1.1.6 Transferencia de estructura	7
1.1.7 Detectores CCD de color	9
1.1.8 Dimensiones de un detector CCD	9
1.2 Rendimiento de un detector CCD	10
1.2.1 Protección	10
1.2.2 Eficiencia contable	10
1.2.3 Sensibilidad espectral	11
1.2.4 Eficiencia de la transferencia de cargas	11
1.2.5 Resolución	12
1.2.6 Linearidad	13
1.2.7 Fluorescencia	13
1.2.8 Sensibilidad a rayos cósmicos	14
1.2.9 Electroluminiscencia	14
1.2.10 Defectos cosméticos	15
1.3 Diferentes tipos de ruido que acompañan a un detector CCD	15
1.3.1 Ruido	15
1.3.2 Ruido térmico	16
1.3.3 Ruido fotónico	16
1.3.4 Ruido de lectura	17
1.3.5 Ruido de cuantización	17
1.3.6 Ruido de variación de sensibilidad	17
1.4. Limitantes de ruido	18
1.4.1 Límites de ruido que puede permitir una cámara CCD	18
1.4.2 Experimentación con el ruido térmico	19
1.4.3 Foceldas únicas en un detector CCD	20
1.4.4 Píxeles calientes y muertos	20
1.4.5 El ruido de salida es el límite final	21
1.4.6 Realización de promedios para reducir ruidos	21
1.4.7 Amplificadores de bajo ruido	22
1.4.8 Una salida de CCD es digital	22
1.4.9 Número de Bits necesarios	23
1.5 Imágenes digitales	24
1.5.1 Los seis tipos de imágenes de un detector CCD	24
1.5.2 La imagen original	26
1.5.3 La imagen de fondo	27

1.5.4	La imagen oscura	28
1.5.5	La imagen térmica	30
1.5.6	La imagen de campo plano	31
1.5.7	La imagen calibrada	33
2.	Análisis y selección de la cámara digital	36
2.1	Análisis de arquitecturas de la electrónica	37
2.1.1	Electrónica asociada a un detector CCD	37
2.1.2	Análisis de las diferentes arquitecturas para cámaras digitales	37
2.2	Análisis de cámaras digitales comerciales	41
2.2.1	Análisis comercial	41
2.2.2	Análisis de categorías para astrofotografía amateur	43
2.3	Selección de la cámara digital	44
2.3.1	Elección del semi-conductor CCD	44
2.3.2	Sub-sistemas básicos que integran la cámara digital	45
2.4	Definición de requerimientos para la cámara	48
2.4.1	Fuente de alimentación	48
2.4.2	Electrónica	49
2.4.3	Sistema de enfriamiento	50
2.4.4	Cuerpo de la cámara	50
2.4.5	La computadora	50
2.4.6	Software de operación	51
2.5	Análisis de costos	52
2.5.1	Costos estimados para la fabricación de la cámara	52
2.6	Teoría de operación del semi-conductor CCD TC-245	53
2.6.1	El semi-conductor TC-245	53
2.6.2	Detección de carga en el TC-245	54
2.6.3	Obtención de imágenes	56
2.6.4	Unión interna	56
2.6.5	Unión externa	56
2.6.6	Unión externa e interna combinadas	57
2.6.7	Muestreo doble	57
2.7	Electrónica de soporte	57
2.7.1	Paso de las señales de tiempo al CCD	57
2.7.2	Suministro de voltajes para el CCD	58
2.7.3	Inversión y digitalización de la imagen	58
2.7.4	Regreso de la imagen a la computadora	59
2.7.5	Software de control para el TC-245	59
1.	Diseño de la cámara digital	60
3.1	Diseño de la fuente de alimentación	61
3.1.1	Qué hace la fuente de alimentación	61
3.1.2	Cómo trabaja la fuente de alimentación	61
3.1.3	Diagramas del diseño de la fuente de alimentación	62
3.2	Diseño de la interfase de la cámara	64
3.2.1	Qué hace la tarjeta de interfase	64
3.2.2	Cómo trabaja la tarjeta de interfase	64

3.2.3	Operación de las señales de control	65
3.2.4	Operación de los reguladores de voltaje	68
3.2.5	Digitalización de las señales de la cámara	69
3.2.6	Regreso de imágenes	70
3.2.7	Diagramas del diseño de la tarjeta de interfase	71
3.2.8	Diseño de la caja de interfase	72
3.3	Diseño de la tarjeta pre-amplificadora	72
3.3.1	Qué hace la tarjeta pre-amplificadora	72
3.3.2	Cómo trabajan los relojes	73
3.3.3	Cómo trabaja el pre-amplificador	73
3.3.4	Diagramas del diseño de la tarjeta pre-amplificadora	75
3.3.5	Diseño de la cubierta de la tarjeta pre-amplificadora	76
3.4	Diseño del cuerpo de la cámara	76
3.4.1	Qué hace el cuerpo de la cámara	76
3.4.2	Cómo trabaja el cuerpo de la cámara	77
3.4.3	Diagramas del diseño del cuerpo de la cámara	78
3.5	Diseño del sistema de enfriamiento	81
3.5.1	Qué hace el sistema de enfriamiento	81
3.5.2	Cómo trabaja el sistema de enfriamiento	83
3.5.3	Cómo trabaja el sistema Peltier	83
3.5.4	Diagramas del diseño del sistema de enfriamiento	86
3.6	Software de operación de la cámara	86
3.6.1	Qué hace el software de la cámara	86
3.6.2	Cómo trabaja el software de la cámara	87
3.6.3	Funciones generales del software AP-245	87
4	Construcción de la cámara digital	90
4.1	Construcción de la fuente de alimentación	91
4.1.1	Construcción del casco	91
4.1.2	Ubicación de los componentes	91
4.1.3	Alambrado de componentes AC	91
4.1.4	Alambrado de componentes DC	92
4.1.5	Pruebas de operación	92
4.2	Construcción de la tarjeta de interfase de la cámara	93
4.2.1	Ensamble y pruebas de la tarjeta de interfase	93
4.2.2	Cable de interfase	94
4.2.3	Cable de alimentación	94
4.2.4	Instalación de la tarjeta en su caja	95
4.3	Construcción de la tarjeta pre-amplificadora	95
4.3.1	Ensamble de cables y conectores	95
4.3.2	Ensamble y pruebas de la tarjeta pre-amplificadora	96
4.3.3	Fabricación de la cubierta pre-amplificadora	96
4.4	Construcción del cuerpo de la cámara	96
4.4.1	Fabricación y ensamble del cuerpo de la cámara	96
4.4.2	Instalación de los componentes	97
4.4.3	Ensamble final	97

4.5	Construcción del sistema de enfriamiento	97
4.5.1	Ensamble del sistema de enfriamiento	97
4.5.2	Pruebas del sistema de enfriamiento	97
5.	Integración y pruebas	98
5.1	Operación inicial de la cámara	99
5.1.1	Calibración y chequeo final	99
5.1.2	Primeras imágenes digitales	102
6.	Astrofotografía	104
6.1	Obtención de imágenes astronómicas	105
6.1.1	Preparación del equipo	105
6.1.2	Primeras imágenes astronómicas	106
6.2	Procesamiento de imágenes digitales	109
6.2.1	Análisis de las imágenes	109
6.2.2	Escalas	109
6.2.3	Filtraje y restauración de las imágenes	109
6.2.4	Calibración final de las imágenes	110
	Conclusiones	116
	Apéndice	120
	Glosario de Términos	128
	Bibliografía	131

Introducción

Una cámara basada en un detector de imágenes CCD (charge coupled-device) es un dispositivo electrónico sensor de luz.

Cuando un dispositivo como estos se coloca en la mira de un telescopio de tal manera que la luz proveniente de una parte del cielo incide en el semi-conductor CCD de silicio, se acumula una imagen sobre el semi-conductor.

Después de una exposición de tiempo que puede durar desde una fracción de segundo hasta diez o más minutos, la imagen en el semi-conductor de silicio se convierte electrónicamente en números, es decir, se digitaliza y posteriormente se transfiere a una computadora donde dichos números pueden ser almacenados, manipulados y desplegados en la pantalla.

La computadora puede desplegar con la misma facilidad una imagen que contiene un rango completo de valores numéricos (pixeles), o bien, una imagen con un rango muy pequeño de valores numéricos. La capacidad de poder exhibir un diminuto rango de valores numéricos proporciona a las cámaras CCD su aparente alta velocidad fotográfica.

Por ejemplo, con un telescopio modesto no profesional, se puede obtener una imagen excelente de una galaxia con una exposición de solo 200 segundos. El rango de valores numéricos en la imagen de la galaxia podría estar comprendido entre 0 y 1,000, donde 0 representa el negro (el fondo del cielo) y, 1,000 representa el núcleo de la galaxia. Sin embargo, se podría capturar una imagen reconocible de la misma galaxia con solo una exposición de 2 segundos. Los números que representan la imagen en esta última exposición ahora estarían comprendidos en un rango de 0 a 10, 0 para el fondo del cielo y 10 para el núcleo de la galaxia. Aunque la calidad de una imagen de 2 segundos no se puede comparar con la de una imagen de 200 segundos, la segunda imagen es enteramente adecuada para localizar objetos muy ténues en el espacio profundo.

Las cámaras basadas en los semi-conductores detectores de imágenes CCD son 10 veces más sensibles que las películas fotográficas más rápidas que existen hoy en día.

Un semi-conductor detector de imágenes CCD no es un elemento perfecto, pero existen numerosos métodos y técnicas para compensar este defecto. Si los semi-conductores detectores CCD fueran precisos cualquiera sería capaz de tomar simples exposiciones de algún objeto y se almacenaría un registro exacto de la intensidad de la luz que cae sobre cada fotocelda del semi-conductor CCD, sin embargo, esto no sucede en la realidad y cuando se obtiene una imagen a través de un detector de imágenes CCD el registro resultante está lleno de ruidos y falsos efectos.

Las tecnologías para producir estos diminutos semi-conductores en masa, amplificar las pequeñísimas corrientes que estos semi-conductores generan, digitalizar las señales de salida y almacenar las imágenes que producen, han avanzado enormemente al grado que ahora es posible poner al alcance de cualquier persona una cámara CCD, sin embargo, los precios de estos dispositivos resultan aún prohibitivos, en la mayoría de los casos.

La tabla no 1 muestra una serie de cámaras CCD que se comercializan actualmente para aplicaciones astronómicas, y como podrá observarse resulta un verdadero lujo contar con una herramienta tecnológica como estas.

CAMARAS DIGITALES COMERCIALES PARA APLICACIONES ASTRONOMICAS			
FABRICANTE	MODELO	RESOLUCION PIXELS	PRECIO DOLARES
SANTA BARBARA INSTRUMENTS GROUP	ST-4	192 X 164	\$890
	ST-4X	192 X 164	\$1,190
	ST-5	320 X 240	\$1,800
	ST-6	375 X 242	\$3,000
	ST-7	768 X 510	\$2,790
	ST-8	1534 X 1020	\$2,450
COMPUSCOPE	CCD800	768 X 512	\$4,995
	CCD1800	1536 X 1040	\$9,995
SIRIUS INSTRUMENTS	CWIP	320 X 200	\$1,299
ELECTRIM CORPORATION	EDC-1000	192 X 330	\$1,090
	EDC-1000TE	192 X 330	\$1,250
	EDC-1000HR	753 X 488	\$1,850
	EDC-1000U	1134 X 972	\$1,250
	EDC-1000C	753 X 488	\$1,950
MEADE	PICTOR 208XT	336 X 242	\$795
	PICTOR 216XT	336 X 242	\$1,195
	PICTOR 416XT	768 X 512	\$2,495
	PICTOR 1616	1024 X 1024	\$6,995
AXIOM RESEARCH	AX-1	768 X 512	\$8,000
	AX-4	2048 X 2048	\$10,500
	AX-6	1536 X 1040	\$13,500
HIGH SENSITIVITY IMAGING SYSTEM	HI-SIS22	768 X 512	\$2,500
SPECTRA SOURCE INSTRUMENTS	LYNXX PC	192 X 164	\$990
	LYNXX 2000	336 X 240	\$2,350
	TELERIS	768 X 512	\$3,260
OPTICAL DESIGN SOLUTIONS	HFC	1024 X 1024	\$6,500
	IMG-1300	1300 X 1028	\$5,600
STARLIGHT	XPRESS	500 X 256	\$1,995
HELIUS DESIGN	HELIUS	1152 X 770	\$4,350

Tabla No. 1

Desde un punto de vista tecnológico y comercial, de la tabla anterior, se pueden establecer rangos o categorías de acuerdo al tamaño y resolución de los semi-conductores CCD utilizados en las cámaras.

La relación de categorías se detalla en la tabla no 2. Entre mayor es el tamaño del semi-conductor, mayor es la complejidad del equipo electrónico y como consecuencia mayor el costo de las cámaras

Las cámaras dentro de las categorías 4 y 5 son consideradas de tipo profesional

Las de categoría 1 y 2 se consideran de carácter "amateur" con las que se pueden realizar trabajos fotográficos y fotométricos serios.

La categoría 3 es un paso intermedio entre lo profesional y lo amateur

El objetivo de este trabajo es mostrar que es posible la construcción de una cámara de fabricación "casera" a un precio muy razonable y con características de operación comparables a cualquiera de las cámaras de su género

De un análisis más detallado se determinó que es muy complejo y aún muy costoso la construcción de una cámara con características similares a las de categoría 3, 4 y 5.

Asimismo, se resumió que la construcción de una cámara con características de categoría 1 no excedería los \$ 395.28 dólares y que la construcción de una de categoría 2 no sobrepasaría los \$ 542.71 dólares

RELACION DE CATEGORIA CONTRA PRECIO		
CATEGORIA	RESOLUCION (PIXELES)	PRECIO PROMEDIO DOLARES
1	192 X 164	\$1.082
2	336 X 242	\$1.930
3	768 X 512	\$3.698
4	1536 X 1040	\$8.434
5	2048 X 2048	\$10.500

Tabla No. 2

Debido a que el semi-conductor CCD utilizado en las cámaras de categoría 2 tiene casi dos veces la resolución y tamaño que el semi-conductor usado en las cámaras de categoría 1, se concluyó que por solo una diferencia de \$ 147.43 dólares, que corresponde en gran medida a la diferencia en precio de los semi-conductores CCD, resulta más conveniente la construcción de una cámara de la categoría 2.

Adicionalmente, y como podrá apreciarse a lo largo de este trabajo, se buscó en gran medida reducir los costos de fabricación, como por ejemplo, el casco de la fuente de alimentación así como algunos de sus componentes, el sistema de enfriamiento y las cajas de protección para las tarjetas de interfase, se fabricaron con materiales que normalmente se tienen en casa. De manera semejante, las herramientas y equipo empleados en la fabricación, son los mismos con los que normalmente cuenta cualquier persona que estudia una carrera de ingeniería o similar.

CAPITULO 1.

Tecnología de un detector de imágenes CCD.

1.1 Qué es un detector de imágenes CCD.

1.1.1 Origen del detector CCD.

El detector de imágenes CCD (Charge Coupled Device) o dispositivo acoplado por carga fué desarrollado en 1970 por Boyle y Smith en los laboratorios Bell. El semi-conductor CCD original fué diseñado para almacenar y transferir información analógica en forma de paquetes de cargas eléctricas dentro de una estructura de semi-conductores. Los paquetes de cargas son memorizados en celdas de almacenamiento compuestas usualmente por capacitores tipo MOS (Metal-Oxide Semi-conductor). Puede haber de cientos a miles de capacitores MOS en un semi-conductor. Las celdas del semi-conductor son acopladas o unidas mediante circuitería de transferencia que hace posible mover las cargas de una manera ordenada a un punto donde puedan ser medidas. Los semi-conductores CCD tienen varios usos, entre ellos memorias y detectores ópticos.

1.1.2 El capacitor MOS.

El capacitor MOS (figura 1.1) está compuesto por un material semi-conductor llamado sustrato de silicio que se encuentra cubierto por una capa aislante de dióxido de silicio SiO_2 y sobre el cual se encuentra un electrodo metálico llamado compuerta. La capa de dióxido de silicio es de solo unas décimas de micras de espesor y el electrodo metálico es un depósito de aluminio o de silicio policristalino finamente recubierto por una substancia que lo convierte en un elemento altamente conductor. La capa de dióxido de silicio hace la estructura aislante del MOS y así forma un capacitor o fotocelda.

En un detector fotosensitivo con registros CCD, las cargas eléctricas se crean a través del efecto fotoeléctrico. Las celdas de almacenamiento también son fotoelementos (elementos sensitivos a la luz) y pueden estar organizadas en líneas, a lo que se le llama un arreglo lineal CCD, o bien, pueden estar organizadas en líneas y columnas que son denominadas arreglo de matriz.

La inyección de cargas, su almacenamiento, su transferencia y su lectura son las funciones básicas que realiza un detector CCD.

El semi-conductor TC-211 de Texas Instruments está compuesto por 165 líneas de 192 fotoceldas cada línea y, se identifica como una matriz de 165X192 fotoceldas o pixeles. Cada fotocelda está formada por un revestimiento de sustrato de silicio separado por una capa aislante de dióxido de silicio y arriba de este arreglo se encuentran una serie de cintas de poli-silicio. Cada cinta de poli-silicio define una línea de fotoceldas.

En cada línea, las fotoceldas son separadas por delgadas bandas de silicio llamadas "channel stops" o "canales de paro" que se encuentran llenas de átomos de boro. Las bandas de canales de paro bloquean el movimiento de electrones a través de las líneas de silicio.

Cuando la luz cae sobre cada fotocelda del detector CCD, los fotones pasan de las capas de poli-silicio y óxido de silicio hacia las bandas de silicio (canales de paro) y ahí

interactúan con los átomos del cristal de silicio liberando electrones de dichos átomos. A este proceso se le denomina efecto fotoeléctrico.

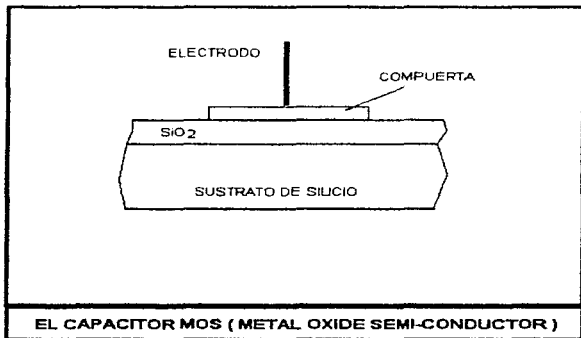


Figura 1.1

El número de electrones liberados es proporcional al número de fotones de entrada. En un buen semi-conductor, el 60% de los fotones de entrada liberan un electrón.

Cuando un voltaje positivo apropiado se aplica a las bandas de poli-silicio, los electrones quedan atrapados dentro de un potencial eléctrico.

Durante una exposición de las fotoceldas del semi-conductor, los fotones de entrada liberan electrones y estos se acumulan dentro del potencial eléctrico generado en cada fotocelda. En términos de electrónica, el enjambre de electrones se convierte en un "paquete cargado" atrapado dentro de un potencial eléctrico alto. A lo largo de cada línea, los electrones son bloqueados por las bandas canales de paro y por los potenciales eléctricos generados.

Bajo ciertas condiciones, un "paquete cargado" puede ser almacenado por horas dentro de un potencial eléctrico. La utilidad del semi-conductor CCD se tiene cuando se encuentra una técnica para transferir la carga (formada por los electrones liberados por la luz) de la fotocelda a un amplificador sensible a la carga.

Para mover dicha carga, el voltaje aplicado a la banda de poli-silicio se cambia de un voltaje positivo a un voltaje negativo y de esta manera los electrones ya no quedan atrapados dentro del potencial eléctrico.

Cada paquete cargado se puede transferir de una fotocelda cada vez que el voltaje se cambia de positivo a negativo y después a positivo nuevamente.

Un semi-conductor CCD cuenta también con una línea especial de fotoceldas (píxeles) llamada registro serial. El registro serial es similar en estructura al resto del arreglo del semi-conductor y los paquetes cargados pueden ser transferidos al registro serial cambiando el voltaje aplicado.

Cada vez que se transfiere una línea del semi-conductor CCD al registro serial, dicho registro serial mueve cada uno de los paquetes cargados a un amplificador que se encuentra al final del registro serial. Este amplificador mide la cantidad de carga que recibe y genera un voltaje proporcional a la cantidad de luz que cayó sobre cada fotocelda.

En la práctica, cada vez que se desea usar un semi-conductor CCD, primero se "limpia", es decir, se transfieren todos los paquetes cargados del semi-conductor hacia afuera varias veces, posteriormente se exponen las fotoceldas por un período determinado de tiempo llamado tiempo de integración, aplicando un voltaje positivo a las bandas de poli-silicio para crear un potencial eléctrico en cada fotocelda y, a medida que los fotones chocan con las bandas de poli-silicio se van acumulando electrones dentro de los potenciales eléctricos.

Para obtener toda la información acumulada en las fotoceldas, el registro serial se limpia en primera instancia y, posteriormente se libera sobre él una primera línea de paquetes cargados, mismos que a su vez son llevados al amplificador uno a uno. El registro serial se limpia nuevamente permitiendo aceptar una nueva línea de paquetes cargados. Este proceso continúa hasta que cada paquete cargado de cada línea se ha llevado al amplificador.

Los semi-conductores que se fabrican en la actualidad son tan extraordinarios que la sensibilidad de dos fotoceldas adyacentes difiere en menos del 1% y, a lo largo de todo el semi-conductor dicha variación total de la sensibilidad es menor al 10%. Esta medida permite que cada paquete cargado que se transfiere de una fotocelda a la siguiente conserve el 99.998% de los electrones. Aún después de miles de transferencias de fotocelda a fotocelda, menos del 1% de los electrones de un paquete cargado original se pierden en el proceso.

En un detector ideal todas las fotoceldas serían idénticas, sin embargo, en los semi-conductores convencionales el tipo y cantidad de sustrato de silicio varía de fotocelda a fotocelda. También, defectos cristalinos diminutos y variaciones en las bandas de poli-silicio y óxido de silicio afectan la respuesta del silicio a los fotones.

Las fotoceldas por su propia naturaleza exhiben una variedad de propiedades, como por ejemplo, cada fotocelda genera una cierta cantidad de electrones aún cuando dicha fotocelda no sea expuesta a la luz. Estos electrones llamados electrones térmicos son el resultado del movimiento térmico de los átomos en el cristal del sustrato de silicio del semi-conductor y, también son almacenados dentro de los potenciales eléctricos como los electrones generados por la luz.

Si la señal térmica de cada fotocelda se repitiera perfectamente no habría mayor problema, pero, desafortunadamente el número de electrones térmicos generados en un intervalo de tiempo varía aleatoriamente. Esto quiere decir que la señal térmica nunca será la misma en dos imágenes sucesivas. Esta variación en la señal térmica se conoce como ruido térmico.

La temperatura de operación del semi-conductor juega otro papel muy importante. A la temperatura ambiente, los electrones térmicos pueden saturarse dentro del potencial eléctrico en unos cuantos segundos. Cuando este efecto sucede, se dice que el semi-conductor se ha saturado. Cuando se enfría el semi-conductor CCD a una temperatura de -25°C el número de electrones térmicos se reduce por un factor de 1,000; lo que hace posible hacer exposiciones del semi-conductor a la luz por varios minutos. A temperaturas aún más bajas los electrones térmicos se reducen a valores aceptables que permiten realizar exposiciones del semi-conductor a la luz por varias horas.

En cada temperatura de operación, el número de electrones térmicos generados varía enormemente de una fotocelda a otra debido a que algunas fotoceldas se encuentran más calientes que otras. El semi-conductor CCD ideal consistiría de fotoceldas enfriadas de tal modo que generarían pequeñas cantidades de electrones térmicos.

1.1.3 Detector de imagen tipo lineal.

Un detector de imagen lineal (figura 1.2) está compuesto de una línea fotosensitiva y uno o más registros de transferencia. La línea fotosensitiva puede tener de cientos a varios miles de fotoceldas o píxeles.

El detector más grande de este tipo tiene 60 mm de largo con píxeles de 10 micras de longitud. Este detector, que consiste en un arreglo de dos líneas de registros de transferencia, optimiza su funcionamiento debido a que cuenta con una capacidad mucho mayor para almacenar un número mayor de cargas, o bien, disminuye el número de transferencias necesarias para transferir todas las cargas. Uno de los registros de transferencia recibe información de los píxeles impares y, el otro, de los píxeles pares. Después de un cierto tiempo de integración realizado, las cargas son transferidas simultáneamente hacia los dos registros de transferencia, por medio de la compuerta de transferencia, la cual asegura que todas las cargas se encuentren encerradas bajo las fotoceldas durante la exposición. Los paquetes de cargas son secuencialmente transferidos a los registros de transferencia. Estos registros de transferencia se encuentran protegidos de la luz por medio de una cubierta de aluminio. El diodo de salida solo recibe un paquete de cargas a la vez, uno del registro par y luego uno del registro impar. La información de la línea fotosensitiva es realmacenada en este nivel. El amplificador es utilizado para amplificar la señal recibida, o bien, para mantener dicha señal en un valor constante, de modo que pueda ser procesada fácilmente.

Durante la transferencia de los paquetes cargados, una imagen nueva se registra en la línea fotosensitiva y posteriormente se transfiere a los registros de transferencia y, así sucesivamente hasta terminar con las exposiciones. El tiempo de integración corresponde al tiempo de lectura del arreglo. El tiempo mínimo de integración que se puede generar es

de 1 milisegundo para un arreglo de 1,000 elementos que son leídos a una frecuencia de 1 Mhz.

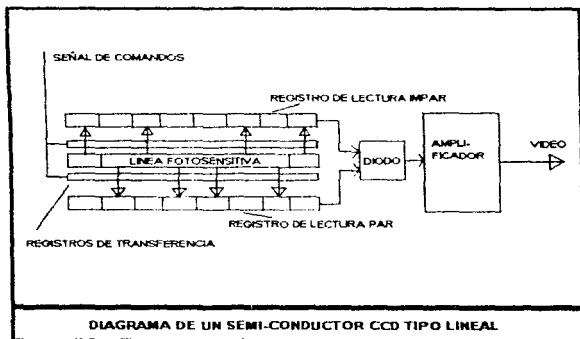


Figura 1.2

1.1.4 Detector de imagen tipo matriz.

Para obtener una imagen con un detector tipo lineal, la escena observada o el mismo detector se debe mover en una dirección perpendicular a la línea fotosensitiva. El detector tipo lineal trabaja perfectamente cuando por ejemplo, un documento es digitalizado, que es el caso que se tiene en una máquina de fax o en un examinador (scanner) para computadora. En Astronomía, sin embargo, la luminosidad de los objetos es extremadamente débil por lo que se requiere de una tasa de rastreo sumamente lenta para integrar un número suficiente de cargas. Por consiguiente, un detector tipo lineal no es una buena solución para astrofotografía, sin embargo, existe también el detector tipo arreglo o matriz (figura 1.3), es decir, un detector formado por líneas y columnas. Un detector de este tipo puede registrar imágenes bi-dimensionales.

Existen esencialmente dos tipos de detectores de matriz, que difieren entre sí por sus técnicas de transferencia: transferencia de interlíneas y transferencia de estructura.

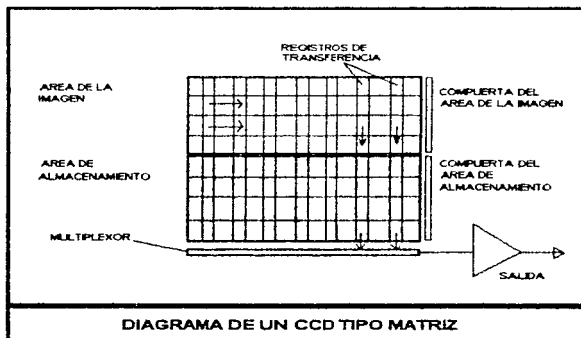


Figura 13

1.1.5 Transferencia de interlineas.

Un detector de este tipo trabaja de la siguiente manera. Al final del tiempo de integración las cargas generadas en las fotoceldas son transferidas simultáneamente a los registros de transferencia. El tiempo de transferencia es de aproximadamente un microsegundo. Mientras las fotoceldas colectan una nueva imagen, el paquete de cargas que está presente en el registro de transferencia vertical, es transferido línea por línea al registro horizontal. Este registro horizontal se lee de tal forma que la información llega de modo secuencial al amplificador de salida.

1.1.6 Transferencia de estructura.

En este tipo de arreglo existen dos áreas similares en el mismo detector. Una zona es sensitiva a la luz y constituye la zona de la imagen, y la otra es idéntica en estructura, pero se encuentra cubierta para evitar que la luz caiga sobre ella y se le denomina la zona de memoria.

Después de un tiempo de integración en la zona de la imagen, las cargas son transferidas a la zona de memoria, lejos de la luz. Durante el paso de las cargas de la zona de la imagen a la zona de memoria, los relojes que ordenan la transferencia en estas dos

secciones del detector son idénticos. En cada unidad de tiempo de los relojes, el contenido de una línea de la zona de la imagen es transferido a otra línea en la zona de memoria hasta que todas las cargas son transferidas.

Posteriormente, se transfiere línea por línea la información contenida en la zona de memoria a los registros horizontales, como en el proceso de transferencia de interlíneas anteriormente mencionado.

En el eje vertical del arreglo CCD las cargas son retenidas debido a la presencia de campos eléctricos diferenciales entre los electrodos sucesivos. En el eje horizontal, las líneas se encuentran separadas por bandas o canales de obstrucción llamados "canales de paro" los cuales previenen que las cargas se deslicen en esa dirección.

El tiempo de transferencia de la zona de la imagen a la zona de memoria debe ser muy corto comparado con el tiempo de exposición para evitar cualquier defecto sobre la imagen. El tiempo de transferencia es usualmente de varios micro-segundos mientras que el tiempo de integración puede ser superior a una hora. Similarmente, el tiempo de lectura del arreglo completo es corto comparado con el tiempo de exposición, de 100 milisegundos a varias docenas de segundos, dependiendo de la técnica de lectura utilizada y del número de píxeles que contiene el arreglo. La zona de memoria, por lo tanto, no siempre es necesaria. Por esta razón, algunos fabricantes de detectores CCD, en ocasiones desarrollan los detectores de tal forma que la zona de memoria es convertida en otra zona de imagen, doblando de esta manera el área fotosensitiva.

La tecnología de transferencia de estructura es la usada en aplicaciones astronómicas. Una técnica específica para la obtención de imágenes llamada atraso en el tiempo de integración es posible en los detectores CCD que utilizan el modo de transferencia de estructura. Esta técnica mueve la imagen óptica de la superficie sensitiva al mismo tiempo en que es leída la zona de la imagen. El movimiento de la imagen y las cargas es sincronizada, es decir, el desplazamiento de un punto de la imagen ocurre a la misma velocidad en que una carga es transferida de un fotoelemento al siguiente. El tiempo de integración de un punto de la imagen es igual al tiempo que toma cubrir la longitud de la zona fotosensitiva del detector, o bien, es equivalente, a la duración de la transferencia de la zona de la imagen a la zona de memoria. El efecto causado por la función de atraso en el tiempo de integración tiene una amplitud de un píxel, lo cual no perjudica la resolución de la imagen en la mayoría de las aplicaciones.

Existen dos ventajas principales para la función de atraso en el tiempo de integración:

Primera.- Debido a que un punto de la imagen se integra sobre todos los fotoelementos de una columna, la calidad radiométrica es excelente. Si imagináramos una mota de polvo colocada sobre un fotoelemento en una lectura normal del arreglo, tendríamos una imagen final con una mancha negra. En el modo de atraso del tiempo de integración, el efecto del polvo es promediado con la contribución de todos los píxeles pertenecientes a la columna (más de 100 píxeles). El polvo, por lo tanto, sería casi invisible en la imagen final.

Segunda.- Es posible obtener bandas de imágenes por kilómetros. Solo se debe permitir que la imagen observada pase por el detector al mismo tiempo en que las líneas de la imagen son leídas regular y continuamente. La dimensión de la imagen final, depende entonces solo de la duración del pase de la imagen observada.

Este modo de atraso de tiempo de integración es utilizado en programas de reconocimiento espacial automático para búsqueda de asteroides o cometas. Con este método, el telescopio se opera fijamente y el movimiento diurno produce el desplazamiento de la imagen en el área sensitiva. La frecuencia de lectura del detector debe ser perfectamente sincronizada con la velocidad del movimiento de la escena en el plano focal.

1.1.7 Detectores CCD de color.

Los detectores CCD se utilizan comúnmente en video cámaras donde hay una fuerte demanda de imágenes de color y, por consiguiente, existen dispositivos que han sido desarrollados para obtener imágenes de color directamente. Para este proceso, los fotoelementos son alternadamente cubiertos con filtros coloreados del tamaño de un pixel; generalmente rojos, verdes y azules. La información que viene de los tres grupos de pixeles se separa mediante un procedimiento especial de separación de la señal de video. Tres imágenes distintas obtenidas a través de los filtros se puede obtener y combinar electrónicamente para producir una imagen de color.

El uso de detectores de color en Astronomía no es recomendado. La separación física de los pixeles requerida para producir los tres componentes de color, disminuye significativamente la resolución de la imagen por un factor de tres, comparada con un detector monocromático. La razón de que el pixel azul no esté localizado al nivel del pixel verde y este a su vez del pixel rojo, plantea problemas difíciles para procesamiento fotométrico. Este problema puede ser complicado aún más, con el hecho de que con algunos detectores CCD los pixeles correspondientes a los diferentes componentes de color no son del mismo tamaño. Adicionalmente, la transmisión espectral de los filtros usados en los detectores de color es muy diferente de las transmisiones utilizadas para Astronomía, particularmente en trabajos de Astrofísica, ya que es muy perjudicial en trabajos de estudios comparativos.

1.1.8 Dimensiones de un detector CCD.

Uno de los problemas que aquejan a un detector CCD es el tamaño de la superficie sensitiva, especialmente cuando se compara con el tamaño de una película fotográfica. Un detector típico tiene 512 X 512 pixeles, cada uno de 20 micras cuadradas, lo que proporciona una superficie sensitiva de 1 cm². Una emulsión fotográfica de 35 mm presenta una área 8.5 veces mayor y una placa fotográfica de 9 X 12 cubre un campo 100 veces mayor en el foco del mismo instrumento de observación. Por supuesto que los fabricantes tratan de remediar esta desventaja, ya que en la actualidad existen detectores de 60 mm de longitud.

Sin embargo, hacer componentes de tal tamaño con gran calidad es muy difícil. Tales detectores de gran tamaño requieren una superficie de silicio con la cual pueden ser elaborados docenas de dispositivos más pequeños. Adicionalmente, los detectores de gran tamaño pueden ser producidos solo a tasas muy bajas de producción, usando lo más reciente en tecnología, que siempre resulta costosa.

Una solución barata para incrementar el tamaño del campo de observación es usar varios detectores lado a lado. Este método se llama técnicamente, de entremezcla. Los detectores se unen bajo un soporte común y existen huecos de varias décimas de micras de ancho donde los detectores se encuentran uno a otro, sin embargo, estas zonas no son perjudiciales comparando el área total resultante.

Otra alternativa para incrementar el campo sin unir detectores consiste en separar el campo observado en varias partes por un procedimiento óptico donde la imagen de cada campo se envía a un detector CCD en particular.

Con detectores CCD grandes se presentan muchas pérdidas que llegan a ser de consideración en la transferencia de cargas. Adicionalmente, los tiempos de lectura de estos arreglos llegan a ser prohibitivos porque llegan a contener, algunas veces, hasta cuatro compuertas de salida.

1.2 Rendimiento de un detector CCD.

1.2.1 Protección.

Los detectores CCD usualmente se encuentran protegidos por una cubierta de cerámica. La luz cruza una ventana de vidrio para poder alcanzar la superficie sensitiva y, por consiguiente, los elementos sensitivos no son directamente accesibles y no se pueden contaminar accidentalmente.

La integridad del detector CCD es muy buena mientras se respeten las condiciones eléctricas que especifica el fabricante. Como todos los circuitos MOS, un detector CCD puede ser destruido si se somete a cargas electrostáticas fuertes. Durante su manipulación se deberá usar una banda conectada a tierra con una resistencia de 1 Mohm para disipar la corriente estática ya que dicha resistencia actúa como un limitador de corriente.

Es importante señalar que la retina fotosensitiva de un detector CCD puede someterse a la luz intensa sin sufrir de algún daño.

1.2.2 Eficiencia contable.

La eficiencia cuántica o contable (EC) se define como la siguiente relación:

$$EC = \frac{\text{PROMEDIO DE FOTONES DETECTADOS/PIXEL/SEGUNDO}}{\text{PROMEDIO DE FOTONES INCIDENTES/PIXEL/SEGUNDO}}$$

La eficiencia cuántica es siempre menor a 1 debido a que no todos los fotones incidentes provocan la aparición de un electrón. En el caso de un detector CCD se tiene que la eficiencia cuántica se encuentra en un rango comprendido entre el 40% y el 80%. Este rango no es un resultado malo si se compara con la eficiencia de una película fotográfica cuya eficiencia se encuentra en un rango del 2% al 4%.

Si un fotón produce un fotoelectrón, el fotoelectrón no necesariamente podrá ser medido a la salida del detector CCD. Hay varias razones para explicar esta situación. Por ejemplo, el fotoelectrón se puede perder durante la transferencia de las cargas, o bien, se puede mezclar con las fluctuaciones de las señales que se generan durante la salida de las cargas.

Este fenómeno produce ruido que se puede combinar con la información y por lo tanto evita su detección. Por esta razón, la eficiencia cuántica no es necesariamente un buen criterio para determinar la calidad de un detector CCD. El término de eficiencia cuántica puede ser reemplazado por el de eficiencia cuántica detectable ECD.

La relación señal/ruido de un sensor perfecto está ligada solo a la fluctuación estática del número de fotones recibidos por unidad de tiempo. Bajo estas condiciones, la expresión del cuadrado de la relación señal/ruido está dada por la expresión :

$$\left(\frac{\text{SEÑAL}}{\text{RUIDO}} \right)^2 = \frac{N^2}{X^2}$$

donde N es el número de fotones recibidos durante la medición y X^2 es la variación de la señal medida. Se puede demostrar que el número de fotones recibidos por unidad de tiempo sigue la Ley de Poisson cuando N es un número grande, lo que permite decir que la variación es igual al promedio de fotones incidentes. Con la hipótesis de que N es un número grande, el número de fotones incidentes durante la medición puede, en una primera aproximación, ser considerado igual a N, si se consideran muchas mediciones. Por consiguiente, la relación señal/ruido del detector CCD perfecto sería:

$$\left(\frac{\text{SEÑAL}}{\text{RUIDO}} \right)^2 = N$$

1.2.3 Sensibilidad espectral.

Un detector CCD puede registrar sin demasiadas complicaciones radiación de 0.4 mm a 1 mm de longitud de onda. La posibilidad de observar radiación arriba de 0.7 mm es una característica importante considerando que el ojo y las películas fotográficas son insensibles arriba de este límite.

La sensibilidad espectral puede cambiar ligeramente cuando se transfieren las cargas de un píxel a otro. Este cambio debe tomarse en cuenta cuando se realicen correcciones radiométricas precisas de las imágenes.

1.2.4 Eficiencia de la transferencia de cargas.

Durante el proceso de transferencia de cargas de un registro a otro, un cierto número de cargas se quedan en las fotoceldas. Si N₀ es el número de cargas de una fotocelda y si N₁

es el número de cargas bajo la siguiente fotocelda, después de la transferencia, la eficiencia de la transferencia de cargas se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$ETC = 1 - \frac{No - N1}{No}$$

De esta expresión se deduce que solo pueden ser toleradas en un detector CCD ineficiencias de transferencia muy pequeñas, por ejemplo, si el 1% de las cargas se queda después de cada transferencia, un paquete que contiene inicialmente 100 electrones, contendrá después de 100 transferencias:

$$100e^- \cdot (0.99)^{100} = 37 \text{ electrones.}$$

En los detectores CCD actuales, los paquetes se mueven un promedio de 500 veces. Esta es una de las razones por la cual los fabricantes de detectores CCD tratan de obtener tasas de transferencia casi perfectas.

Los registros de transferencia de los detectores CCD actuales cuentan con una eficiencia de transferencia de 0.999990. Adicionalmente, la eficiencia de transferencia depende de la temperatura. Este fenómeno es muy importante bajo los -100 °C donde la movilidad de las cargas se decremente considerablemente al grado en que se bloquea la operación del detector CCD. La eficiencia de la transferencia también se decrementa cuando los paquetes contienen un número muy pequeño de cargas, por ejemplo, menos de 1,000 electrones por paquete. Este problema puede ser ocasionado por un mecanismo conocido como "trampa para cargas" que resulta de la presencia de impurezas químicas en el sustrato de silicio.

Uno de los métodos utilizados para evitar la "trampa para cargas" consiste en iluminar el detector CCD uniformemente con una luz tenue antes de realizar cualquier exposición. Una breve iluminación provocada por un "led" es suficiente para saturar el detector CCD. Este proceso facilita la transferencia de las fotocargas después de realizada la exposición. Este tipo de mecanismo de relampagueo es utilizado frecuentemente en Astronomía para fotografía convencional. Su principal desventaja es que añade ruido a la imagen, ocasionado por el ruido fotónico de la iluminación uniforme.

1.2.5 Resolución.

La resolución de un detector CCD es una característica que depende de diversos factores:

1. La dimensión del pixel. Entre más grande es el pixel peor es la resolución de la imagen. Los foteoelementos o píxeles, comúnmente son de 10 micras a 30 micras de longitud. Esta característica hace que un chip CCD tenga mucho menor resolución que una buena película fotográfica cuyo grano puede ser menor a 5 micras. Sin embargo, la resolución final es también una función que depende del tamaño de la imagen que se forma en la superficie del chip CCD o de la película fotográfica. En consecuencia la

ampliación de un instrumento deberá ser mucho mayor con un detector CCD que con una película fotográfica para obtener un resultado equivalente.

2. La ineficiencia de la transferencia que ligeramente diluye las cargas de un pixel hacia los siguientes pixeles a medida que todas las cargas son llevadas hacia afuera. La resolución es por tanto una función de la posición del objeto en la retina fotosensitiva.
3. La difusión de las cargas en el sustrato de silicio durante la integración. Esta difusión de cargas es particularmente penetrante por radiación en longitudes de onda larga, misma difusión que se absorbe en el sustrato de silicio. Esta región es casi neutral debido a que no se encuentra bajo la influencia de algún voltaje aplicado a las fotoceldas. Los electrones producidos en esta zona son recombinados, o bien, desplazados por difusión y pueden, posteriormente, ser capturados por los voltajes aplicados a las fotoceldas vecinas. La incertidumbre existente acerca del destino final de los fotoelectrones se denomina "difusión de cargas" y este proceso produce un velo en la imagen tomada en el rango espectral del infrarrojo. Para disminuir la "difusión de cargas" es necesario decrementar el grosor de la capa de silicio de forma tal que las cargas producidas por los fotones de longitud de onda larga se muevan hacia el sustrato de silicio donde son rápidamente recombinadas y de esta forma no participan en la imagen electrónica.

1.2.6 Linealidad.

Sea E la iluminación recibida por un detector CCD y sea S su respuesta a dicha iluminación. Se puede decir entonces que el detector CCD es lineal si se verifica que

$$S = K_1 \cdot E + K_2$$

donde K1 y K2 son constantes.

En la práctica, la linealidad está limitada por el rango de operación de la intensidad. Para una baja luminosidad, la linealidad ya no es posible a consecuencia del fenómeno de umbral tal como lo es el fenómeno de "trampa para cargas". A niveles de iluminación alta el detector CCD se satura. Contiene en esta fase un valor de 10^5 a 10^6 electrones.

La linealidad se mide generalmente por la diferencia existente entre la característica real y una línea recta ideal calculada mediante una regresión lineal. El alto grado de linealidad permite que un detector CCD pueda ser usado para fotometría con una exactitud mayor al 1%.

1.2.7 Fluorescencia.

Cuando un fotoelemento se somete a una iluminación excesivamente fuerte, las cargas acumuladas llegan a ser tan numerosas que se desplazan hacia los fotoelementos adyacentes. Un pixel saturado produce una característica de difusión similar al halo que rodea las estrellas brillantes en una película fotográfica convencional. Adicionalmente, el número de cargas acumuladas en los pixeles puede ser tan excesivo, que su contenido puede no ser vaciado en una o más transferencias. Este fenómeno ocasiona en la imagen

una recta brillante en el punto de saturación y con dirección de la transferencia de las cargas del detector CCD.

Este efecto se denomina "fluorescencia" y es frecuentemente la firma de una imagen CCD. Una iluminación excesiva del detector CCD retiene cargas parásitas que son progresivamente realmacenadas durante lecturas sucesivas de los registros. En consecuencia, es muy importante no saturar el detector CCD entre cada exposición. Los dispositivos anti-fluorescencia implantados en ciertos detectores CCD permiten limitar los efectos de la saturación. Son electrodos colocados en los bordes de las fotoceldas para drenar el sobreflujo de fotoelectrones. Con este tipo de electrodos el flujo puede alcanzar hasta 100 veces el valor de la saturación de un pixel sin la apariencia de "fluorescencia". Por otro lado, la difusión hacia pixeles vecinos no desaparece completamente debido al proceso de difusión de cargas, explicado con anterioridad.

1.2.8 Sensibilidad a rayos cósmicos.

Los rayos cósmicos son partículas con muy alto nivel de energía que pueden interactuar con el silicio para producir una gran cantidad de cargas eléctricas. Usualmente, solo los pixeles cercanos al impacto de los rayos cósmicos son los afectados. Este defecto se muestra en una imagen como una mancha blanca limitada a un solo pixel. Sin embargo, algunas veces los rayos cósmicos no llegan solos y hasta 5 o 6 impactos pueden ser contados en una imagen. El histograma de la energía de los rayos cósmicos presenta un lóbulo pronunciado de tal manera que los impactos de rayos cósmicos producen manchas que tienen aproximadamente la misma amplitud. Algunas veces los rayos llegan de lado al detector CCD y como consecuencia su característica en la imagen es muy tenue. Los detectores CCD gruesos son más afectados al bombardeo de los rayos cósmicos porque la posibilidad de interacción es mayor en una capa gruesa de sustrato de silicio.

La probabilidad de impactos se incrementa a grandes altitudes porque la atmósfera es más delgada y no atenúa los rayos cósmicos como al nivel del mar. A 2,800 metros (la altura del observatorio Pic du Midi, en Francia) se han observado hasta 100 eventos/hora/cm² con un detector CCD Thomson TH7852. Al nivel del mar esta tasa es de 2 a 5 veces menor.

Puede observarse adicionalmente que en los alrededores del detector CCD puede generarse radiación. Algunos vidrios usados como ventanas en algunas cámaras CCD pueden ser también ligeramente radioactivos. Como los rastros dejados por los rayos cósmicos aparecen como estrellas en la imagen, es extremadamente difícil detectarlas. Algunas veces la característica muy puntual y la gran amplitud de dichos eventos permite distinguirlos, pero el mejor método para discriminarlos es tomar dos o más exposiciones del mismo campo y examinarlas.

1.2.9 Electroluminiscencia.

El amplificador de salida de ciertos detectores CCD pueden emitir una débil luz causada por electroluminiscencia. Este fenómeno aparece muy pocas veces. Este efecto es muy

molesto porque el detector CCD puede saturarse por su propia emisión luminosa en sólo unos pocos minutos de integración.

La solución completa a este problema es apagar el equipo, o bien, bajar el voltaje aplicado al circuito amplificador durante la exposición.

1.2.10 Defectos cosméticos.

Se le denomina defecto cosmético a cualquier anomalía o desperfecto que afecte la calidad de la superficie sensitiva. Es común encontrar pixeles aislados con gran cantidad de "comente oscura" que la que tienen los pixeles vecinos, a estos pixeles se les denomina pixeles exaltados. Existen también, pixeles que son completamente insensitivos y a estos se les denomina pixeles oscuros. Algunas veces se encuentran columnas completas de pixeles defectuosos. Un problema que se encuentra ocasionalmente es el de "trampa para cargas" al nivel del pixel. Si el fotoelemento afectado está localizado en la zona de la imagen o en la zona de la memoria, una parte del contenido de una columna se ve afectado (una "trampa" como ésta en el registro horizontal es un verdadero desastre, debido a que el contenido de la imagen completa se ve perturbado). Este proceso produce una característica parecida a la cola de un cometa viniendo del pixel defectuoso. El número de componentes defectuosos es proporcional al área del arreglo del detector CCD. Aún ahora, a pesar del progreso en las técnicas de producción, es común encontrar detectores CCD con algún tipo de defecto. Usualmente los fabricantes ofrecen diferentes niveles de calidad para un determinado tipo de detector CCD. Debido a que ningún detector CCD es perfecto, de 5 a 6 puntos oscuros uniformemente distribuidos a través de la imagen y alguna columna completa defectiva pueden ser tolerados. Las técnicas de procesamiento de imágenes pueden disminuir los defectos cosméticos de los detectores CCD.

1.3 Diferentes tipos de ruido que acompañan a un detector CCD.

1.3.1 Ruido.

"Ruido" es un término técnico que se dá a las variaciones aleatorias en una cantidad medida. En una imagen, ruido significa variación aleatoria en la señal de la fotocelda individual en un chip CCD. El ruido limita la calidad de las imágenes CCD, más que cualquier otra cosa.

Cuando una tecnología llega a ser tan perfecta que se aproxima a los límites fundamentales de la naturaleza, los bloques adicionales de ruido también progresan, tal es el caso de los chips CCD.

En esta sección examinaremos ruidos, tales como el ruido fotónico, el ruido térmico, ruido de lectura, ruido de cuantización y variaciones en la sensibilidad de fotocelda a fotocelda.

1.3.2 Ruido térmico.

El ruido térmico ocurre porque las fotoceldas sensibles a la luz en el chip CCD generan una señal, ya sea que la luz caiga sobre ellas o no. Mientras más caliente está el chip CCD, mayor es la señal térmica; inversamente, cuando se enfría un CCD, la señal térmica baja. Las cámaras CCD para astrónomos aficionados operan alrededor de los -25° Celsius, frío suficiente para tomar imágenes, pero no suficiente para hacer del ruido térmico algo que se pueda ignorar.

El remedio para el ruido térmico es enfriar el CCD hasta que la señal térmica sea insignificante. El ruido térmico es proporcional a la raíz cuadrada de la señal térmica, así, reduciendo la señal térmica se reduce también el ruido térmico. Enfriando un CCD a -80° Celsius se logra esta meta, pero con un considerable incremento de la dificultad y costo en la ingeniería.

Si no se puede eliminar el ruido térmico, se puede medir este, y restárselo a la imagen. En lugar de tomar una exposición, se toman dos. En la primera exposición, la luz del telescopio llega al chip CCD; para la segunda, se toma una fotografía de la oscuridad. Una fotografía así, contiene la luz de la imagen más la señal térmica y, la segunda tiene la señal térmica solamente. Tomar y restar una imagen oscura, o también llamada un cuadro oscuro es un excelente remedio para la señal térmica.

Desafortunadamente, la señal térmica varía aleatoriamente. Si se restan sucesivamente dos cuadros oscuros, la diferencia entre ellos es "ruido aleatorio". Así, cuando se resta el cuadro oscuro durante la calibración de una imagen original, se queda un residuo de ruido térmico, lo que suma una variación aleatoria a la imagen calibrada. Al promediar múltiples cuadros oscuros, se puede reducir la cantidad de ruido térmico que quedó en la imagen cuando esta se calibró.

En la nomenclatura de las imágenes CCD, la señal térmica es llamada comúnmente "ruido térmico".

1.3.3 Ruido fotónico.

El número de fotones que alcanzan al CCD mientras se realiza una exposición, varía aleatoriamente, de la misma forma que si se tratara de anticipar el número de gotas de lluvia pegando en un segmento de tierra específico durante una tormenta.

En un promedio de 100 fotones que fluyen sobre una fotocelda en el chip CCD durante cada minuto (100 es la señal), se puede esperar que la cuenta actual varíe en un promedio de más o menos 10 fotones ($\sqrt{100}$ es el ruido). Esto significa que la proporción de ruido de la señal es $100/10$ ó 10. Una proporción de ruido de la señal de 10 es una detección razonablemente sólida, pero se desearía que fuera mejor.

El remedio es una exposición más larga. Si se acapara luz por diez minutos en lugar de un minuto, se captarían 1000 fotones con una variación promedio de 31. Aunque

una variación de 31 es mayor que una variación de 10, ahora se tiene que la proporción de ruido de la señal es $1000/31$ ó 31 fotones caídos. Una proporción de ruido de la señal de 31, es una detección tres veces mejor para una exposición diez veces más larga.

1.3.4 Ruido de lectura.

El ruido de lectura ocurre porque, como las señales son leídas del CCD, el chip amplificador no puede determinar con precisión, cuantos electrones han llegado de cada fotocelda. Los fabricantes de cámaras especifican el ruido de lectura como la variación aleatoria en el número de electrones, por ejemplo, 80e rms. Esto significa que la variación promedio al leer la señal es 80 electrones.

Comparado a la máxima señal de 150,000 electrones que típicamente puede dar un CCD, 80 electrones es un error diminuto. Pero si se están tratando de capturar objetos muy ténues, se debe buscar en una señal de 200 electrones, para la cual una variación aleatoria de 80 electrones es muy significativa.

Amplificadores más sofisticados que los comúnmente utilizados en cámaras CCD para aficionados, emplean técnicas tales como muestreo doblemente correlacionado, en el que un paquete de carga es medido repetidamente para reducir el ruido de lectura. La cámara Lynx, por ejemplo, viene en dos versiones, una con doble correlación y la otra sin ella. Para el más bajo ruido posible de lectura, se debe tener muestreo doblemente correlacionado.

1.3.5 Ruido de cuantización.

El ruido de cuantización es el precio que se paga por tener datos digitales. Cuando la cámara digitaliza la salida del chip CCD, la señal se divide en pasos digitales. Una cámara de 8 bits divide la señal en 256 pasos, una cámara de 12 bits divide la señal en 4,096 pasos y una cámara de 16 bits divide la señal en 65,536 pasos. Si se tiene una cámara de 8 bits, la cuantización en 256 pasos será tan burda como la incertidumbre introducida por el ruido de lectura, el ruido térmico o el ruido fotónico; y bajo esas circunstancias, el ruido de cuantización establece con qué exactitud la cámara puede capturar una imagen.

1.3.6 Ruido de variación de sensibilidad.

Los CCD modernos, proporcionan una uniformidad del 1% entre la vecindad de las fotoceldas y un 10% sobre la superficie total del chip. En las aplicaciones ordinarias del CCD, se podría no estar consciente de que hay algunas diferencias globales, pero en Astronomía, es necesario extraer las señales de galaxias ténues fuera de un fondo de cielo que es más brillante que ellas mismas. El 1% normal, algunas veces no es suficientemente bueno.

El remedio es tomar una imagen de campo plano, que son imágenes de superficies uniformemente iluminadas, tales como una pared blanca o el cielo crepuscular. Cada

fotocelda en el CCD produciría exactamente la señal, pero no es así. Sobre exposiciones a una fuente uniforme, las fotoceldas más sensibles producen señales más pequeñas, así, la imagen de campo plano sirve como un mapeo de la sensibilidad a la luz del CCD.

Cuando llega el tiempo de calibrar las imágenes, la computadora usa la imagen de campo plano para determinar la sensibilidad relativa de cada fotocelda y aplica una corrección de sensibilidad a cada pixel correspondiente en la imagen. Las variaciones de fotocelda a fotocelda, trazadas en el sistema óptico del telescopio, y los efectos por polvo y suciedad son eliminados en gran medida, dejando la imagen limpia y uniforme.

1.4 Limitantes de ruido.

1.4.1 Límites de ruido que puede permitir una cámara CCD.

Las fotoceldas sufren de ruido térmico. Cuando los fotones golpean una fotocelda, liberan electrones. Desafortunadamente, la movilidad térmica de los átomos en el chip, también libera electrones. La salida de un CCD consiste en una mezcla de señales deseadas, causadas por luz, y señales indeseadas como la señal térmica.

El ruido térmico existe porque cada una de las fotoceldas sensibles a la luz en el chip CCD genera una señal, ya sea que la luz caiga en ellas o no. Mientras más caliente esté el CCD, más grande será la señal térmica. En chips CCD operados a temperatura ambiente, la señal térmica es suficientemente grande para saturar las fotoceldas en unos pocos segundos.

La señal térmica resulta de la movilidad de los átomos en la capa de silicio. Enfriar un CCD reduce la energía vibratoria de los átomos, y así el número de electrones libres que disfrazan la señal térmica.

Las cámaras CCD para astrónomos aficionados, operan alrededor de -25° Celsius, frío suficiente para hacer práctica la toma de imágenes, pero no suficiente para eliminar el ruido térmico por completo.

La salida de un CCD por lo tanto, consiste en la suma de electrones térmicos y electrones generados por luz que inciden en el CCD. Como no hay manera de decir de donde llegará un electrón, la señal térmica se vuelve parte de la señal del CCD. El ruido térmico resulta de las variaciones aleatorias en la señal térmica. Cuando se calibra una imagen original, se puede sustraer la mayor parte de la señal térmica sin dificultad. Sin embargo, la variación aleatoria permanece como una fuente de ruido en la imagen calibrada.

El enfriamiento es muy efectivo en la reducción de la señal térmica. Por cada 5° Celsius de reducción en la temperatura, la señal térmica se reduce a la mitad (pero la imagen varía de CCD a CCD). El enfriamiento de un CCD de la temperatura ambiente (25° C) a temperatura de operación (-25° C) corta el ruido térmico por un factor de 300, permitiendo exposiciones de muchos minutos más.

En la mayoría de las cámaras CCD, el enfriamiento se efectúa al montar el chip CCD sobre un enfriador termoelectrico conocido como módulo Peltier. Cuando una corriente se pasa a través de un enfriador termoelectrico, un lado del dispositivo se vuelve frio, y el otro lado caliente. Apilando tres ó más enfriadores, las diferencias de temperatura de 50° C y mayores, entre el lado frio y el caliente de la pila, son perfectamente factibles.

El enfriamiento del CCD reduce grandemente el ruido térmico, pero introduce una nueva serie de problemas. Tan rápido como el chip es enfriado por debajo del punto debido, se condensa agua sobre las superficies frías, y si se enfría por debajo del congelamiento, se forma hielo. Por lo tanto, los chips CCD son albergados en empaques o cajas selladas herméticamente y cargados con gas seco así como con un agente secante. Sin embargo, después de algún período de tiempo, la humedad puede entrar a la cámara a través de minúsculos poros en el empaque y condensarse como escarcha cuando la cámara está trabajando. Un rápido chequeo de escarcha, puede llegar a ser parte de la rutina de operación de una cámara digital.

1.4.2 Experimentación con el ruido térmico.

Es posible investigar el ruido térmico en una cámara al tomar exposiciones oscuras a varias temperaturas y registrar las señales de salida resultantes en una gráfica. Para hacer esto, se opera la cámara sin encender el enfriador y cubriéndolo de tal forma, que la luz no pueda entrar. Con un termómetro preciso, se mide la temperatura ambiente; se trabaja la cámara por lo menos sesenta minutos para alcanzar el equilibrio térmico (se sabe que la cámara ha llegado al equilibrio cuando la señal térmica se vuelve estable). Se toma una serie de exposiciones incrementando la longitud de la exposición, empezando con las exposiciones más cortas que la cámara pueda hacer. Se mide el valor del pixel, de un pequeño grupo de pixeles, como una función del tiempo de exposición. Se debe observar que la señal térmica se incrementa linealmente con el tiempo. A la temperatura ambiente, la cámara probablemente se saturará en menos de un minuto y probablemente, mucho más rápido.

Ahora se enciende el enfriador de la cámara, la señal térmica cae rápidamente y se estabiliza en unos quince minutos a un nuevo valor. Se repite la serie de exposiciones, y otra vez se grafica la señal térmica como una función del tiempo.

Se quita el enfriador de la cámara y se coloca la cámara en un refrigerador o congelador, permitiéndole llegar al equilibrio térmico; esto puede tomar tres o cuatro horas, pero se debe ser paciente y observar la señal térmica. Con el mismo termómetro se mide la temperatura ambiente y se repite la serie de exposiciones. Una y otra vez se notará que la señal térmica se incrementa linealmente con el tiempo.

Finalmente, con la cámara aún en el congelador, se enciende el enfriador de la cámara y se repiten las mediciones de la señal térmica. Si el nivel de ruido es el mismo o cercano a él, la circuitería de regulación de temperatura está realizando un excelente trabajo.

Se grafican los promedios de crecimiento de la señal térmica contra la temperatura. Es claro por consiguiente que el enfriador es mejor para los chips CCD.

1.4.3 Fotoceldas únicas en un detector CCD.

Cada fotocelda en un chip CCD es un poco diferente: algunas son más sensibles a la luz, algunas producen más ruido térmico y pocas, son defectuosas. Las diferencias entre las fotoceldas agregan variaciones artificiales en la brillantez de los píxeles en la imagen.

El ideal del mundo CCD, es un arreglo de fotoceldas perfectamente idénticas. La realidad es que cada celda en una fotocelda de un CCD es diferente. La sensibilidad de cada fotocelda y su ruido térmico, varían desde sus elementos. Aunque las variaciones son pequeñas, son significativas y no pueden ser ignoradas, sin embargo, la mayoría de las variaciones de sensibilidad térmica y de variación de fotocelda a fotocelda pueden ser calibradas. Los CCD no son ideales, pero sus deficiencias pueden ser eliminadas enormemente.

1.4.4 Píxeles calientes y píxeles muertos.

La individualidad de las fotoceldas en un CCD se nota más en la variación de su señal térmica. Aún en un buen chip, la señal térmica de fotoceldas individuales puede variar por un factor de dos o más. Cuando se examina una imagen térmica, esto es, una imagen hecha sin luz, se debe ver un patrón de píxeles iluminados y oscurecidos.

Los píxeles son a las imágenes, como las fotoceldas son a los CCD. El grueso de los píxeles caerán dentro de un rango bastante estrecho, con número de píxeles progresivamente más pequeño al tomar valores extremos.

Disperso a través de la imagen se puede ver también, un puñado de píxeles completamente negros y uno de píxeles completamente blancos. Los píxeles blancos o brillantes son llamados "píxeles calientes", y los negros son llamados "píxeles muertos". Los píxeles calientes corresponden a fotoceldas que producen a la larga, más ruido térmico que la mayoría de las fotoceldas en el chip, y los píxeles muertos corresponden a fotoceldas que están inactivas por alguna razón.

Suponiendo que se estuvieran examinando dos imágenes CCD tomadas bajo condiciones idénticas, pero una de ellas tomada con el telescopio tapado, de tal manera que ninguna luz del cielo pudiera entrar. Una imagen mostraría claramente el objeto celestial y la otra no. En las dos imágenes, se encontrará que el patrón de píxeles calientes y píxeles muertos es el mismo; más aún, las posiciones de los píxeles algo más brillantes en una imagen corresponden a los píxeles algo más brillantes en la otra, y de igual forma para los píxeles un poco más oscuros. Aún con el conocimiento de que cada fotocelda es única, dentro de ciertos límites su comportamiento es predecible y repetitivo.

Si el ruido térmico fuera perfectamente idéntico de imagen a imagen, simplemente se tendría que restar la imagen oscura, en una base pixel-por-pixel, de la imagen del objeto celeste, y toda traza de ruido térmico se habría ido. Sin embargo, la cantidad de ruido térmico varía aleatoriamente. Esto significa que no se puede restar exactamente el ruido térmico de una imagen, pero se puede restar una aproximación de él.

Si se toman una serie de imágenes térmicas y se les promedia, se puede reducir el ruido restante. El promedio de ruido térmico de, por ejemplo cuatro imágenes, es una medición más verdadera del comportamiento de la fotocelda, que el valor en una sola imagen térmica. Tomar el promedio individual de cada comportamiento térmico de la fotocelda sobre varias imágenes es, por lo tanto, una ventaja cuando se usa una cámara CCD.

1.4.5 El ruido de salida es el límite final.

El límite final del desempeño del CCD es aquel número de electrones en la señal CCD que el amplificador del chip y la subsecuente electrónica pueden medir. Mientras mejor sean el amplificador y la electrónica, mejores serán las imágenes resultantes.

El ruido de salida resulta de las variaciones aleatorias por estática en el amplificador y la electrónica de la cámara CCD. Ocurre porque, como las señales son leídas del CCD, el amplificador no puede determinar con precisión cuantos electrones han llegado de cada fotocelda en el chip.

Bajo condiciones óptimas, los mejores chips CCD con grado de búsqueda tienen un ruido de lectura de 1 e⁻ rms, pero los de 5 e⁻ rms son mucho más comunes. Las cámaras CCD para aficionados a la Astronomía son remarcadamente buenas.

Para poner un aspecto práctico sobre el ruido de lectura de salida, se considera el efecto sobre las imágenes que se pueden obtener con una cámara tal como la LynxxPC.

Para tomar imágenes planetarias, el obtener imágenes de campo plano es más importante que tener un ruido de lectura de salida bajo.

En imágenes de cielo profundo, sin embargo, la situación es bastante diferente. Suponiendo que se quiere obtener una imagen de una galaxia tenue que produce un valor de pixel de 25, una variación aleatoria de valor de pixel de 2 produce incertidumbre significativa. En este caso, una cámara con un ruido de lectura de 20 e⁻ rms introduce una incertidumbre de menos de 1 del valor de pixel, que es altamente benéfico.

Sin embargo, el mundo real es más complejo. Suponiendo que la galaxia produce un valor de pixel de 25 contra un fondo de cielo de 400, las variaciones de sensibilidad de pixel-a-pixel producirían una significativa incertidumbre de 4 en el valor de pixel (por ejemplo 1% de 425). Es claro que para obtener los mejores resultados, se deben realizar cuidadosas imágenes de campo plano, tan buenas como si se usara una cámara con bajo ruido de lectura.

1.4.6 Realización de promedios para reducir ruidos.

Promediar las imágenes reduce la amplitud del ruido, porque el ruido de lectura es aleatorio. Desafortunadamente, promediar reduce ruido a razón de la raíz cuadrada del número de imágenes que se promedian; si se promedian cuatro imágenes, la amplitud del ruido se reduce a la mitad; nueve y se corta el ruido por un factor de tres; dieciseis cuadros y se gana un factor de cuatro. Se vuelve impráctico ir más lejos.

Como el ruido de salida se aumenta a cada cuadro por igual, imágenes hechas al promediar un gran número de exposiciones cortas contienen más ruido que el de imágenes hechas al promediar un pequeño número de exposiciones más largas. El ruido fotónico y el ruido térmico dependen únicamente del tiempo total de exposición, pero el ruido de salida crece a la razón de la raíz cuadrada del número de cuadros. Una imagen hecha al promediar 16 exposiciones de un minuto tendrá dos veces el ruido de una imagen hecha al promediar 4 exposiciones de cuatro minutos. Para cámaras como la ST-6 con modo de Track y de Accumulate (rastrear y acumular), se obtendrá el mínimo ruido con las exposiciones más largas que el telescopio pueda rastrear confiablemente.

1.4.7 Amplificadores de bajo ruido.

El remedio para el ruido de salida, es una cámara con electrónica más sofisticada, que puede significar gastar mucho más. Sin embargo, el costo extra puede ser justificado, si se quieren tomar imágenes que lleven la tecnología CCD hasta sus límites finales. La cámara Spectra Source Lynxx viene en dos modelos, la Lynxx y la Lynxx-2. La Lynxx tiene un ruido de salida de 80 e⁻ rms. La Lynxx-2 usa una técnica especial llamada "muestreo doblemente correlacionado" para reducir el ruido de lectura a 20 e⁻ rms.

Para tomar imágenes críticas, la cámara más sofisticada puede hacer la diferencia entre el éxito o el fracaso.

1.4.8 Una salida de CCD es digital.

Cuando se lee la imagen de un chip CCD, la salida es convertida de analógica a digital. La imagen llega a la computadora como un río de números que pueden ser sumados, restados, multiplicados y divididos.

La cuantización es el paso final al convertir un río de fotones que llegan de una imagen digital. Los fotones entran al silicio del CCD, generando electrones que son almacenados durante la exposición como paquetes de carga eléctrica. Cuando se lee el CCD, los paquetes de carga eléctrica se mueven hacia el amplificador del chip. El amplificador sensa el número de electrones de cada paquete de carga y produce un voltaje proporcional de salida que es, en su turno, enviado a un convertidor analógico/digital (ADC).

Se dice que la salida del convertidor ADC ha sido cuantizada porque se representa a la señal como un número binario. En otras palabras, debe tener un valor que es un paso discreto entre el más bajo número binario (0) y el más alto número binario (1) que el convertidor ADC puede producir.

Las cámaras CCD producen una salida de 8, 12 o 16 bits. El número de bits determina cuantos pasos representa el voltaje de salida del CCD. Una cámara de 8 bits divide la señal en 2^8 , o 256 pasos; una cámara de 12 bits en 2^{12} , o 4,096 pasos y, una cámara de 16 bits en 2^{16} , o 65,536 pasos.

El verdadero beneficio de una cámara CCD se tiene después de que la salida de la cámara ha sido digitalizada y almacenada en una computadora. Una computadora puede restar una imagen de otra, dividir una imagen entre otra, y realizar comparaciones entre los valores de píxeles.

Si se toma una imagen original y un cuadro térmico o imagen térmica, la imagen original consiste en un arreglo de números, donde cada número es la suma de ruido térmico más la señal producida por la luz. El cuadro térmico contiene un arreglo de números, representando el ruido térmico únicamente.

Si se resta el valor de cada píxel de la imagen térmica del píxel correspondiente en la imagen original, solo se tendrá la señal producida por la luz que cae sobre el chip. Si entonces se divide el valor de cada píxel por el correspondiente valor de píxel en un cuadro de campo plano (una imagen de superficie uniformemente iluminada), se pueden corregir las variantes en la sensibilidad de las fotoceldas individuales en el CCD. Hasta aquí, la imagen digital permite corregir efectos que podrían ser muy difíciles o imposibles de corregir de alguna otra forma.

1.4.9 Número de bits necesarios.

Si se tiene una cámara de 8 bits, la cuantización en 256 pasos puede ser más burda que la incertidumbre introducida por el ruido de lectura, el ruido térmico o el ruido fotónico. El ruido de cuantización puede limitar qué tan exactamente la cámara puede capturar una imagen. Para tomar imágenes satisfactoriamente, se necesitan suficientes bits para garantizar que la imagen que la cámara CCD ha capturado sea representada adecuadamente en la computadora.

En las cámaras de 8 bits hechas para Astronomía, la cuantización usualmente es el factor limitante. El chip TC211 común a muchas de esas cámaras tiene un rango dinámico de cerca de 4,000 a 1. Cuando se examinan las imágenes de las cámaras de 8 bits, se verá el signo característico de la cuantización: áreas de un lado a otro, de varios píxeles, que tienen el mismo valor de píxel. Esto significa que la cuantización, al contrario del ruido térmico o el ruido de salida limitan la precisión con que son definidos los valores de píxel.

Los diseñadores de cámaras generalmente se esfuerzan en hacer la cuantización más fina que otras fuentes de ruido, pero no tan fina como es necesario. La cámara Spectra Source Lynxx, que produce datos de 12 bits, está limitada por ruido térmico y ruido de lectura, pero la Lynxx-2, equipada con un amplificador más sofisticado, está limitada en cuantización.

El ruido térmico, el ruido de lectura, y el ruido fotónico limitan el funcionamiento de una cámara de 16 bits, mucho más que la cuantización. Ambos, el ruido térmico y el ruido de lectura dejan a una cámara como la ST-6 con el equivalente de quizá 6,000 pasos de brillantez, representados por 65,536 niveles digitales, pero también una manera práctica y efectiva para pasar datos de imágenes de alta calidad a la computadora.

Como corolario se tiene que, si se requieren tomar imágenes serias, se debe evitar conseguir una cámara de 8 bits. Se debe escoger en su lugar una cámara de 12 bits o de 16 bits.

1.5 Imágenes Digitales

1.5.1 Los seis tipos de imágenes de un detector CCD.

Las imágenes digitales se clasifican en seis tipos: imágenes originales, cuadros de fondo, térmicos, oscuros, de campo plano y las imágenes calibradas. La imagen original graba un objeto celeste; los cuadros de fondo, térmico, oscuro y de campo plano permiten remover el ruido. La imagen calibrada es la meta.

Las imágenes CCD presentan las siguientes características:

Imagen original

- Una imagen del objeto y señales adicionales de cualquier fuente posible.
- Contiene una señal causada por luz de un objeto celeste.
- Contiene las señales térmicas y de fondo.
- Contiene variaciones de sensibilidad de fotocelda a fotocelda.

Cuadro de fondo

- Una imagen hecha con una exposición de duración cero.
- Contiene ruido aleatorio de lectura del amplificador.
- Contiene ruido de la electrónica de la cámara.

Cuadro oscuro

- Una imagen de cualquier cosa, exceptuando un objeto celeste.
- Contiene señales térmica y de fondo.
- Igual a la suma del cuadro térmico más el cuadro de fondo.

Cuadro térmico

- Una imagen de la señal térmica del chip CCD.
- Contiene la señal térmica acumulada durante el tiempo de exposición.

Cuadro de campo plano

- Una imagen hecha al exponer el CCD a un campo uniforme de luz.
- Constituye un mapa de las variaciones de sensibilidad de fotocelda a fotocelda.
- Es capaz de remover sombras de polvo de las imágenes.

Imagen calibrada

- Una imagen que representa aproximadamente la luz que cayó sobre el chip CCD.
- Tiene sensibilidad uniforme a la luz en cada punto en la imagen.
- Libre de las señales de fondo y térmica.
- Conserva ruido aleatorio residual de los cuadros de fondo, térmico y de campo plano.

La señal de una simple exposición de una sola fotocelda en un chip CCD es igual a la suma de los voltajes de fondo y térmico de esa fotocelda, más el producto del número de fotones por las veces recibidas en la fotocelda.

Esto es llamado la señal original. Si no cae absolutamente luz en el CCD, entonces la señal consistirá solamente de la suma de los voltajes de fondo y térmico de la fotocelda.

Para medir el número de fotones que golpean a una fotocelda particular, se tomarían dos mediciones sucesivas de la señal de la fotocelda, la primera con la luz cayendo sobre la fotocelda y la segunda sin luz cayendo sobre ella. Al restar la segunda

medición de la primera, se determinaría cuánto de la señal fué debido a la luz que cae sobre la fotocelda. Finalmente, si por algún medio se determinara la sensibilidad de la fotocelda, se dividiría la señal debida a la luz por la sensibilidad y entonces se calcularía cuantos fotones han caído en la fotocelda. Matemáticamente, para una sola fotocelda, la señal original es la suma de las señales térmica, de fondo y fónica:

$$\text{Original} = \text{Fondo} + \text{Térmica} + (\text{Fotones} * \text{Sensibilidad})$$

donde "Original" es la salida de la fotocelda, "Fondo" es la señal de una exposición de duración cero, "Térmica" es la señal debida a electrones generados térmicamente, "Fotones" es el número de fotones golpeando la fotocelda, y "Sensibilidad" es la señal generada por fotones.

Para obtener el número de fotones que han golpeado una sola fotocelda, la ecuación se escribe como:

$$\text{Fotones} = (\text{Original} - \text{Fondo} - \text{Térmica}) / \text{Sensibilidad}$$

Para medir los fotones de una fotocelda, de la señal original se restan las señales de fondo y térmica, y se divide el resultado por la sensibilidad de la fotocelda.

Por conveniencia, es preferible medir la señal oscura en lugar de las señales de fondo y térmica. La "Oscura" es una exposición en la que la luz no golpea la fotocelda y es la suma de la de "Fondo" y la "Térmica". Así:

$$\text{Fotones} = (\text{Original} - \text{Oscura}) / \text{Sensibilidad}$$

El tiempo de exposición para la señal oscura debe ser igual al tiempo de exposición para la señal original.

Un CCD real no consiste de una sola fotocelda, por el contrario es un arreglo de miles o aún millones de fotoceldas. Para medir una imagen de un CCD, se debe medir la luz que cae sobre cada fotocelda y calibrarla. Afortunadamente, se puede realizar la calibración de todos los miles de fotoceldas en un CCD en un solo paso. Para todas las fotoceldas, el proceso es idéntico que al calibrar una sola fotocelda:

$$\text{Original} = \text{Fondo} + \text{Térmica} + (\text{Fotones} * \text{Plano})$$

Como el mapa de la sensibilidad de un CCD es llamado cuadro de campo plano, la sensibilidad se puede renombrar como "Plano". Para obtener un mapa de cuantos fotones cayeron sobre el chip CCD, se debe calibrar usando la ecuación:

$$\text{Calibrada} = (\text{Original} - \text{Fondo} - \text{Térmica}) / \text{Plano}$$

Algunas cámaras no tienen la disposición para medir el cuadro de fondo. En su lugar, se debe tomar un cuadro oscuro, que es la suma del cuadro térmico más un cuadro de fondo. Para obtener una imagen calibrada, se puede usar la ecuación:

$$\text{Calibrada} = (\text{Original} - \text{Obscura}) / \text{Plano}$$

Como se pueden calibrar todas las fotoceldas de un CCD a la vez, con el mismo estándar, la imagen de un CCD resulta extraordinariamente uniforme, y esto acoplado con su gran sensibilidad, es la fuente del valor excepcional de las cámaras digitales en Astronomía.

1.5.2 La imagen original.

Cuando se toma una exposición de un objeto celeste, se obtiene una imagen original. En adición a la información que se desea, la imagen original contiene una señal térmica, un ruido de fondo, y variaciones de sensibilidad de fotocelda a fotocelda.

La imagen original contiene cualquier cosa que una cámara CCD pueda generar ya sea bueno o malo. Por el lado bueno, se tiene un registro de la luz que golpeó cada fotocelda en el chip CCD. Desafortunadamente, el registro de luz está mezclado con otras señales del CCD que no son distinguibles de la señal hecha por luz.

Por el lado malo, la señal térmica ha agregado un puñado de píxeles calientes y un fondo aleatorio que oscurece las partes más débiles o ténues de la imagen. El ruido y el voltaje inicial del amplificador del chip cubren otras capas de señales no celestes. Más aún, cada píxel ha registrado más brillo o más oscuridad que la que idealmente podría tener, porque la sensibilidad de la fotocelda que generó ese píxel difiere de la de cada una de las otras fotoceldas.

Al examinar las imágenes originales cuidadosamente se ve cuantos efectos diferentes se pueden encontrar en ellas. Aquí están justamente algunas de las cosas que se pueden ver:

- Una imagen de un objeto celeste, pero que aparece débil o borroso. La imagen celeste es algunas veces más débil que la suma de las fuentes de ruido, y por lo tanto puede estar prácticamente perdida en la imagen original.
- Las partes más oscuras de la imagen no tienen un valor de píxel de cero. En realidad, el valor de píxel más bajo es frecuentemente de 100 o más. Esto es causado por la señal térmica y de fondo del amplificador, ambos efectos incrementan el ruido de fondo aún en ausencia de luz.
- Una dispersión aleatoria de píxeles anormalmente brillantes, o píxeles "calientes". Los píxeles calientes vienen de fotoceldas que generan mucho más ruido térmico que la mayoría de las fotoceldas en el chip.
- Una fosforescencia circular de una esquina de la imagen. Esta fosforescencia ocurre porque en algunas cámaras, el chip amplificador brilla como un diodo emisor de luz. Todos estos efectos pueden ser removidos o reducidos en gran medida al calibrar la imagen original. La calibración produce un mejoramiento casi milagroso, no sólo para objetos muy ténues, sino también para objetos brillantes.

Para tomar imágenes lunares, planetarias y solares; donde los niveles de luz son altos, pero los contrastes bajos, se pueden ignorar los cuadros térmico y de fondo, pero corregir las variaciones de sensibilidad mejora grandemente la calidad de la imagen calibrada. Los cinturones y zonas de Júpiter, por ejemplo, tienen contrastes de cerca de 10%, comparados con las variaciones de fotocelda a fotocelda de 1%. Como resultado, los rasgos débiles se pueden perder. Con una imagen de campo plano bien elaborada se pueden corregir las variaciones a 0.1% o mejor, y detectar los rasgos más débiles correspondientes.

Para tomar imágenes de objetos de cielo profundo, donde los niveles de luz son relativamente bajos y los contrastes son medianamente débiles; el ruido térmico y las variaciones de sensibilidad degradan la imagen y deben ser corregidos. Aún pensando que las variaciones de sensibilidad aparecen enteramente borrosas por el ruido, los campos planos remueven las sombras y permiten aplicar las poderosas técnicas de procesamiento de imágenes para realzar los ténues contrastes entre el objeto y el fondo del cielo.

Bajo algunas circunstancias, una imagen original puede ser tan buena que no se justifican el tiempo y esfuerzo requeridos para tomar los cuadros de soporte. Si se están tomando objetos brillantes de cielo profundo en un clima tan helado de tal manera, que el chip CCD está extremadamente frío, la señal térmica puede ser insignificante. Al determinar, entonces, que los cuadros de fondo son uniformes y que se ha decidido aceptar alguna variación de sensibilidad, se puede saltar a la calibración.

En todas las demás ocasiones, la correcta calibración mejora las imágenes. Las imágenes lunares, planetarias y solares se benefician especialmente de los campos planos, ya que el procesamiento de imágenes incrementa el contraste en la imagen y acentúa las variaciones de sensibilidad en el chip CCD.

1.5.3 La imagen de fondo.

El cuadro de fondo es una fotografía del ruido electrónico de la cámara CCD. Es simplemente una exposición de duración cero. El cuadro de fondo graba los voltajes de inicio, el ruido en el chip amplificador CCD y el ruido generado por la electrónica de la cámara.

Las cámaras hechas para tomar imágenes científicas usualmente incluyen la habilidad de leer como salida un cuadro de fondo. Todas las cámaras CCD hechas por Spectra Source incluyen esta facilidad. Para el simple propósito de restar el ruido térmico y de fondo, no es estrictamente necesario tomar los cuadros de fondo, porque un cuadro oscuro sirve igualmente bien. Sin embargo, para proyectos de toma de imágenes sofisticados, los cuadros de fondo pueden resultar extremadamente útiles.

Un cuadro de fondo es lo que se obtiene como lectura de salida de un CCD después de una exposición de duración cero. En teoría, pero no en la práctica, el cuadro de fondo graba solo el inicio del convertidor analógico-digital, el ruido en el chip amplificador y el ruido en la señal electrónica de la cámara.

Examinando un cuadro de fondo típico se pueden ver las siguientes características:

- Un nivel global y uniforme de valores de pixel, típicamente con un valor de pixel alrededor de 100. Esto es normal, es el voltaje constante de inicio del amplificador.

- Una variación en el fondo de unos pocos datos numéricos. Esto es normal, es variación aleatoria producida por el chip amplificador.

- Un gradiente de brillantez a través del cuadro. Esto es normal si el enfriador de la cámara está apagado o si la cámara lee la salida lentamente. El gradiente ocurre porque el ruido térmico crece durante el tiempo que toma leer los datos del chip. El gradiente desaparece cuando el enfriador está encendido.

- Las líneas onduladas o patrones cruzando la imagen, que indican que el ruido electrónico está de algún modo infiltrado en la señal. Cualquier patrón así, indica un mal funcionamiento. Se debe consultar al fabricante de la cámara para que ayude a corregir el problema.

Siempre que se examinen los cuadros de fondo de la cámara, se deben observar los cambios. Bajo condiciones normales de operación, los cuadros de fondo aparecerán como ruido aleatorio. Si la cámara toma cuadros de fondo, se guardan una docena de ellos y se les inspecciona con alguna función de un programa de procesamiento de imágenes digitales. A primera vista pueden parecer idénticos, pero si se examina el mismo pixel en series de cuadros de fondo, variarán aleatoriamente a través de la secuencia. Como el ruido es aleatorio, cuando se promedian 16 cuadros de fondo, la amplitud de la variación decrece por un factor de cuatro. Siempre que sea posible, se debe planear un programa para tomar imágenes y así, producir suficientes cuadros de fondo para promediar el ruido de salida.

Aún si el software de la cámara no está diseñado para tomar cuadros térmicos, se puede crear uno de alguna manera. Aquí está cómo: un cuadro oscuro es la suma de un cuadro de fondo y uno térmico y el cuadro de fondo es independiente de la exposición, sin embargo, el cuadro térmico se incrementa directamente como una función de tiempo. Si se toman dos cuadros oscuros: uno con dos veces el tiempo de exposición del otro, y entonces se resta la exposición del cuadro oscuro de la dos veces el tiempo de exposición del cuadro oscuro, la diferencia será un cuadro de fondo.

Un cuadro de fondo saludable indica si la cámara está funcionando debidamente. Por rutina se deben checar algunos cuadros de fondo al iniciar cada sesión de toma de imágenes. Si son correctas, se puede proceder con confianza. Sin embargo, si se ven líneas onduladas o patrones cuadrículados en el cuadro de fondo, la cámara no está funcionando en forma adecuada.

1.5.4 La imagen oscura.

Un cuadro oscuro es una exposición en la cual la luz no golpea el chip CCD. El cuadro oscuro graba la combinación de ruido de fondo y ruido térmico para una temperatura específica del CCD y el tiempo de exposición. Los cuadros oscuros se deben tomar inmediatamente antes o después de tomar una imagen original.

Tomar un cuadro oscuro es la manera más fácil de grabar la información necesaria para remover el ruido térmico y el ruido de fondo de una imagen original. Para tomar un cuadro oscuro, simplemente se cubre el telescopio y se toma una fotografía con el mismo tiempo de exposición que se está usando para las imágenes originales. Si se ha tomado un cuadro oscuro que es idéntico a la imagen original en todos aspectos, excepto que no se ha permitido que la luz del cielo alcance la cámara CCD, entonces la señal debida a los fotones es igual a la imagen original menos el cuadro oscuro. Un cuadro oscuro contiene todos los componentes de un cuadro de fondo más todos los componentes de un cuadro térmico. Al cargar un cuadro oscuro de una cámara Lynxx, ST-4, o Electrim en un software de procesamiento de imágenes digitales como AIP o QuikPIX se observa lo siguiente:

- Una dispersión aleatoria de pixeles "calientes" a través de la imagen.
- Un nivel global y uniforme de valores de pixel, típicamente con un valor entre 100 y varios miles. Esta es una combinación del punto inicial del amplificador y la señal térmica.
- Una distribución aleatoria de pixeles oscuros y claros, con más pixeles claros que oscuros. Esta distribución se mezcla con la variación aleatoria del chip amplificador.
- Un resplandor circular desde una esquina de la imagen. Esto ocurre debido a que el chip amplificador produce luz en un proceso llamado electroluminiscencia. Este defecto se suprime en las cámaras Lynxx y ST-6.
- Uno o más "golpes" de rayos cósmicos. Estos son pixeles saturados, distribuidos aleatoriamente en la imagen, causados por radiación de alta energía del espacio.
- Un renglón o una columna de pixeles calientes en los renglones o columnas más externos de la imagen, o partes de renglones o columnas de pixeles calientes. Aunque es indeseable, grupos de pixeles calientes en la orilla del cuadro, son algo común.
- Un gradiente de brillantez a través del cuadro. Esto es debido a que el ruido térmico crece durante el tiempo en que se toma la lectura de datos del chip. Los gradientes son visibles solo en los cuadros oscuros tomados con exposiciones cortas.

Si se ven líneas onduladas o trazos cruzando la imagen, la cámara debe estar sufriendo de filtración eléctrica o interferencia de alta frecuencia. Una columna de pixeles brillantes puede ser causada por un diodo defectuoso en el chip. Si se ve cualquier trazo, se debe documentar el problema cuidadosamente.

Los cuadros oscuros introducen una significativa saturación en las imágenes porque, a primera vista, parece que se necesita uno para cada imagen original. Sin embargo, es deseable compartir un solo cuadro oscuro con dos imágenes originales tomadas antes y después de él. También se puede dar que la cámara tome un cuadro oscuro mientras se está montando el siguiente blanco de observación, sin que el tiempo que se necesita para tomar el cuadro oscuro se haya perdido.

Si se trata de usar un solo cuadro oscuro para toda la noche, podría ser suficiente o no. Una consideración es que si el cuadro oscuro tiene un defecto (un golpe de rayo cósmico, por ejemplo) aparecerá en cada imagen térmicamente corregida que se tome. La segunda consideración es que por cada grado Celsius, el ruido térmico cambia cerca de un 15%. Para calibrar las imágenes correctamente bajo estas circunstancias, la temperatura de la cámara CCD no debe cambiar.

Para mejores resultados es muy recomendable tomar muchos cuadros oscuros. Una cámara con software que permite tomar cuadros de fondo y térmicos es preferible a una cámara que tome solo cuadros oscuros. La temperatura y el tiempo de exposición de un cuadro oscuro debe compaginar con la temperatura y tiempo de exposición de la imagen original.

Los sistemas de cuadro de fondo y térmico de las cámaras son más versátiles. Si es necesario, se puede graduar un cuadro térmico para compaginar la imagen original y así remover la señal térmica de cualquier imagen original tomada con la misma cámara CCD.

El punto final es que para la mayor parte de las imágenes, los cuadros oscuros sirven tanto como los cuadros de fondo y térmicos. Para aplicaciones que demandan versatilidad extra, los cuadros de fondo y térmicos son ligeramente mejores.

1.5.5 La imagen térmica.

Los cuadros térmicos se usan para remover la señal térmica de imágenes CCD. En su forma más simple, un cuadro térmico es un cuadro oscuro menos un cuadro de fondo. La imagen térmica resultante es un mapa de la señal térmica generada por cada fotocelda en la cámara CCD.

Un cuadro térmico es una imagen de la señal térmica del CCD. Para hacer un cuadro térmico, se toma un cuadro oscuro y se resta un cuadro de fondo de él. Las cámaras como la Lynxx realizan esta tarea automáticamente.

Cuando se examina un cuadro térmico, se puede encontrar algo o todo de lo siguiente:

- Un nivel de fondo que crece linealmente con el tiempo de exposición. La proporción con la que el fondo crece depende de la calidad del CCD y de su temperatura. En la cámara Lynxx, el porcentaje varía de la burda cantidad de 400 unidades de valor de pixel por segundo, operando a temperatura ambiente, a 0.1 unidades de valor de pixel por segundo con el enfriador activado en una noche fría de invierno.

- Un espaciamiento aleatorio de pixeles calientes cruzando la imagen. Los CCD con pocos pixeles calientes son mejores que aquellos con muchos, pero es normal tener un pixel caliente por cada 10,000 pixeles normales.

- Unos pocos pixeles saturados distribuidos aleatoriamente en las imágenes. Esto ocurre cuando los rayos cósmicos golpean el CCD, dejando suficiente energía para saturar el diodo que ellos golpean. A nivel del mar, la atmósfera de la Tierra bloquea la mayoría de los rayos cósmicos, pero se debe registrar un rayo cósmico por cada hora de exposición con un chip TC211. Los golpes de rayos cósmicos son más frecuentes en los observatorios de gran altitud.

- Un renglón o columna de pixeles calientes en los renglones o columnas más externos de la imagen, o partes de renglones o columnas de pixeles calientes. Aunque son poco deseables, son normales.

- Una columna o parte de una columna de pixeles brillantes en la imagen. Esto podría deberse a un diodo defectuoso en el chip. Se debe documentar el problema.

Si se tiene una cámara como la ST-4, se verá un prominente brillo circular en una esquina de la imagen. Esto se debe a que el chip amplificador emite tanta luz como lo

hace un diodo emisor de luz. Este es un defecto desafortunado, pero no fuera de lo normal. El brillo del amplificador no es ruido térmico, pero la intensidad del brillo es proporcional a la longitud de la exposición. Esto significa que el brillo del amplificador puede ser tratado como si fuera ruido térmico y corregido idénticamente.

Supongamos que se hace una exposición de 10 minutos de una supernova tenue, pero a 8 minutos y 11 segundos de la exposición se zarandea el telescopio, reaccionando rápidamente, se para la exposición. Si se estuvieron tomando cuadros oscuros, se necesitaría tomar un cuadro oscuro de 8 minutos y 11 segundos. Pero si se tiene un cuadro térmico de 10 minutos, se puede multiplicar por 0.8183 para crear el cuadro térmico equivalente de 8 minutos y 11 segundos, y entonces usar este cuadro térmico creado para calibrar la imagen original. Es mejor graduar los cuadros térmicos hacia abajo que hacia arriba, graduándolos hacia arriba se incrementa la contribución de ruido.

Más importante aún, se puede explotar la propiedad de graduación de los cuadros térmicos para hacer cuadros térmicos compuestos que tienen menos ruido que un cuadro térmico hecho con una exposición. La razón es que cada cuadro térmico tiene su propio ruido. Si se toma una docena de cuadros térmicos, uno sucesivamente después de otro, el valor de cualquier pixel variará aleatoriamente cerca de un valor medio. Al sumar un número de cuadros térmicos y graduar la suma para compaginar con la imagen original, se puede reducir el ruido térmico que se sumó, al restar un cuadro térmico.

Hacer promedio de cuadros reduce el componente aleatorio por la raíz cuadrada del número de cuadros promediados. Si es necesario, se puede reescalar este cuadro promediado para emparejar el ruido en una imagen original. Aunque toma más tiempo, se obtienen mejores imágenes, que compensan el esfuerzo.

La señal térmica se incrementa aproximadamente 15% por cada grado centígrado de incremento en la temperatura. Sin una regulación de temperatura, la habilidad para obtener buen soporte de imágenes depende en gran medida de si la temperatura del aire de la noche es estable.

Con una cámara que tiene regulación de temperatura, conseguir buen soporte de imágenes es más fácil y menos alarmante, y los resultados son mejores.

1.5.6 La imagen de campo plano.

Los cuadros de campo plano se usan para calibrar las variaciones de sensibilidad de fotocelda a fotocelda a través de la cámara CCD. El campo plano es una imagen de un lugar uniformemente iluminado, tal como el cielo crepuscular o una pieza de cartón negro iluminado pegado en la parte interna del domo del observatorio.

Tomar campos planos da a los CCD una ventaja espléndida sobre otros procesos de imágenes. En una operación relativamente simple, se pueden corregir las diferencias de sensibilidad entre las fotoceldas del CCD.

Un campo plano uniforme indica que el chip tiene variaciones de sensibilidad de fotocelda a fotocelda menores. Típicamente se verá no más de un 1% de variación de un pixel al siguiente, y menos del 10% de variación a través del chip entero.

Los campos planos pueden revelar grandes estructuras sistemáticas en la imagen. Varios arcos, manchas, círculos y motas pueden corresponder a hendiduras en el silicio del CCD, durante la fabricación del chip. Si esas estructuras permanecen iguales de un día a otro y de un mes a otro, y tienen menos del 5% de variación en el resto del chip, no hay de que inquietarse, porque no tienen importancia.

Sin embargo, si los campos planos cambian, hay que buscar la causa. La escarcha es un problema común porque el CCD es enfriado por debajo del congelamiento. (En realidad, si la cámara tiene humedad adentro, se puede observar escarcha formada tan rápido como se enciende el enfriador de la cámara). Minúsculos puntos de pintura o metal pueden ser pequeños defectos.

La mejor manera de hacer cuadros de campo plano es la de tomar imágenes de una caja iluminada, pegada al frente del telescopio. Si la caja de luz es fácil de pegar y siempre requiere el mismo tiempo de exposición, eso simplificará en gran medida la realización de los cuadros de campo plano. De los métodos disponibles, los de imágenes obtenidas de una caja de luz tenuemente iluminada son los más convenientes para los Astrónomos aficionados.

El método tradicional de tomar cuadros de campo plano es tomar planos originales del interior del domo del observatorio o del cielo crepuscular. Si se realiza un campo plano a través de un sistema óptico que tiene sombreados y polvo, el campo plano los trazará y se podrán usar para calibrar esas inuniformidades. Es difícil, sin embargo, asegurar que el domo está iluminado uniformemente, y los planos crepusculares pueden ser difíciles de tomar porque el nivel de luz cae muy rápidamente.

Otra manera más fácil de hacer campos planos es iluminar el CCD uniformemente. Se coloca una hoja de vidrio opaco o algún otro difusor uniforme sobre el frente de la cámara en una posición donde la luz que alcance al difusor sea uniforme. Este método es fácil, pero el cuadro de campo plano resultante corrige únicamente la variación de fotocelda a fotocelda en el chip mismo, y no corrige el polvo.

Para cuadros de campo plano, se determina el tiempo de exposición requerido para alcanzar entre 50% y 75% de saturación, y entonces se toma un docena de juegos de cuadros planos originales, de fondo y térmicos. Se toma un cuadro de fondo y uno térmico para cada plano original. Si la cámara no toma cuadros de fondo y térmicos, se deben tomar cuadros oscuros en su lugar.

El cuadro de campo plano es un mapa de fotocelda a fotocelda de la sensibilidad a la luz, de un CCD. El número de fotones capturados en la imagen original es directamente proporcional a la sensibilidad del CCD en cada punto de la imagen:

$$\text{Original} = \text{Fondo} + \text{Térmica} + (\text{Fotones} * \text{Plano})$$

Para hacer un cuadro de campo plano, se debe exponer el CCD al campo que se eligió como uniforme. Cuando se hace un cuadro de campo plano original, se deben restar las señales térmica y de fondo:

$$\text{Plano} = (\text{Original} - \text{Fondo} - \text{Térmico}) / \text{Fotones}$$

Para el menor ruido posible, se promedia un número de cuadros de campo plano. La sensibilidad del chip y sombras de polvo aparecen como variaciones en la sensibilidad del propio CCD. Si la luz que alcanza al CCD no es uniforme por esos defectos, entonces el campo plano se debe remover.

1.5.7 La imagen calibrada.

La imagen calibrada es un registro fiel de la luz que cayó en la cámara CCD durante la exposición de la imagen original. Para hacer una imagen calibrada, se debe procesar una imagen original usando la información contenida en el cuadro de fondo, el cuadro térmico y el cuadro de campo plano.

Cada vez que se calibra una imagen, los resultados sorprenderán. ¡Brillo de amplificador, píxeles calientes, señal térmica y esquinas oscuras, desaparecerán! La imagen aparece tersa, marañas de nebulosidad perdida en el ruido, ahora se difunden a través del espacio de la pantalla de la computadora. El tiempo que se emplea en tomar cuadros de soporte, de repente parece que ha sido un tiempo bien empleado. Al examinar las imágenes calibradas cuidadosamente, aquí está lo que se puede tener:

- Ausencia de píxeles calientes. No se debe ver ningún signo de píxeles calientes, ni los característicos píxeles calientes del ruido térmico. Si se ve un dispersamiento de ruido térmico o píxeles calientes, o un dispersamiento inusual de píxeles oscuros, la temperatura de la cámara puede estar saturada de tal manera que los cuadros oscuros y térmico no hacen juego con la imagen original. Si la cámara hace cuadros térmicos, se puede escalar el cuadro térmico por factores entre un rango de 0.9 y 1.1 hasta encontrar el valor que mejor hace juego con la imagen original.

- Ausencia de la incandescencia del amplificador. La incandescencia del amplificador fué removida cuando se restó el cuadro oscuro. Si se ve una esquina brillante u oscura, el brillo del amplificador puede haber saturado la imagen original o el cuadro oscuro, haciendo imposible removerlo. En cámaras de 8 bits tales como la ST-4, el brillo del amplificador deja algunas veces "anillos", porque el ruido de cuantización de 8 bits limita precisamente cuanto brillo o incandescencia se puede sustraer. En principio, sin embargo, este puede ser removido por completo.

- Un fondo uniforme en imágenes de cielo profundo. Los campos planos deben haber removido sombras de polvo y variaciones de sensibilidad en gran escala a través del CCD. Si se ven uniformidades en el fondo del cielo, se deben revisar los procedimientos que se usaron para tomar los campos planos.

- Un bajo nivel aleatorio de ruido que aún se encuentra a través de la imagen completa. Este fondo aleatorio es la suma cuadrática del ruido aleatorio de la imagen original, el cuadro de fondo, el cuadro térmico y el cuadro de campo plano. La suma cuadrática significa que el ruido aleatorio aumenta como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del promedio de las amplitudes de las fuentes de ruido, y por consiguiente tiende a promediarse aún si este aumenta. Aún la más perfecta calibración está limitada por las leyes de la física. Después de que se ha removido la señal térmica, un componente aleatorio de ruido térmico permanece. Después de que

se ha removido el cuadro de fondo, el ruido aleatorio del amplificador permanece. Después de tomar un campo plano y que se han corregido las variaciones de sensibilidad de diodo a diodo, sólo un pequeño residuo de ruido aleatorio permanece. La única forma de vencer el ruido aleatorio, es promediando. Una imagen original, cuatro cuadros de fondo, cuatro térmicos y cuatro cuadros de campo plano cortan el ruido aleatorio por un factor de dos. Una imagen original, nueve cuadros de fondo, nueve térmicos y nueve cuadros de campo plano cortan el ruido aleatorio por un factor de tres. Tomando y almacenando cuatro imágenes originales, soportadas por 36 cuadros de fondo, 36 cuadros térmicos y 36 cuadros de campo plano, se podría cortar el ruido por un factor de 6.

El ruido CCD es ciertamente molesto, pero se debe ver el lado amable. La simple imagen calibrada, tiene ya capturadas estrellas y galaxias fejanas tan ténues que no podrían ser tomadas con película fotográfica, y en menos tiempo tampoco. La imagen es más precisa que cualquiera hecha hace diez años, y mejor que la que cualquier Astrónomo ya sea aficionado o profesional hubiera tomado veinte años atrás.

El software de una cámara puede ofrecer rutinas de calibración que sustraen un cuadro oscuro y dividen por un cuadro de campo plano. Esta puede ser una gran conveniencia, especialmente cuando se es nuevo con las imágenes CCD, porque se puede ver lo que se obtiene, en el mismo momento. En verdad, se puede estar realmente contento con los resultados. Sólo se debe recordar que la cámara puede hacerlo aún mejor.

Para obtener los mejores resultados de las imágenes, se deben guardar todas las imágenes originales, y los cuadros de soporte. Se deben calibrar las imágenes cuando se le pueda dar a este importante trabajo, una completa atención. Cuando se inspecciona cada cuadro de soporte original por golpes de rayos cósmicos y otros defectos y se hace uso total de las técnicas de promediado, se obtendrán imágenes calibradas valiosas por el tiempo y esfuerzo que se puso en ellas.



Imagen original del planeta Saturno tomada con un telescopio de 12" operando a una razón focal F/35. Tiempo de exposición de un segundo.
La imagen original se giró 60 grados en sentido horario para mostrar esta posición.

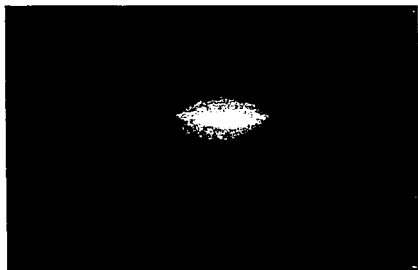


Imagen final calibrada del planeta Saturno. Se utilizó el programa Superfix para su procesamiento.

CAPITULO 2.

Análisis y selección de la cámara digital.

2.1 Análisis de arquitecturas de la electrónica.

2.1.1 Electrónica asociada a un detector CCD.

En el diseño de una cámara CCD se debe reconocer que se trata de un dispositivo interactivo. Con un dispositivo interactivo, se debe visualizar la imagen y procesarla tan pronto como se realice una exposición. Esta capacidad es una cualidad mayor porque si un problema se encuentra en tiempo real se debe tener la capacidad de resolverlo inmediatamente. La noción de interactividad también incluye la facilidad de manipulación de las imágenes utilizando dispositivos de almacenamiento como disco flexible, disco duro, unidades de cinta magnética, etc.

La electrónica asociada con un detector CCD se puede comprender en los siguientes sub-grupos: a) Generación de los relojes, b) Generación de los voltajes aplicados tanto al detector CCD como a la electrónica, c) Amplificación de la señal de video, d) Conversión analógica/digital de la señal de video, e) Interfase con la computadora.

Existen sistemas diseñados para digitalizar directamente la señal de video generada, una cámara de TV estándar es un ejemplo. Por consiguiente es posible utilizar una cámara de video con una computadora, sin embargo, sin la electrónica requerida, es imposible realizar exposiciones muy largas. Una cámara de video puede, debido a su estructura de transferencia, grabar objetos estelares solamente abajo de la tercera magnitud con un telescopio con un lente o espejo de 200 mm de diámetro. (El ojo humano es capaz de percibir objetos celestes, en una noche muy oscura, hasta de la sexta magnitud. Cada incremento en la magnitud corresponde aproximadamente a un objeto 2.5 veces menos brillante que la magnitud anterior). Adicionalmente, la frecuencia de digitalización utilizada en una cámara de TV estándar es tal, que es difícil trabajar con una resolución mayor a 8 bits en intensidad (256 niveles de intensidad) lo cual no es adecuado para un trabajo astronómico. Los digitalizadores más rápidos que trabajan con un número grande de bits ya se están comercializando, pero su precisión digitalizadora es mucho menor de lo que se debería esperar para una cámara basada en un detector CCD para fines astronómicos. Una grabadora de video cassettes tampoco es otra alternativa para astronomía, debido principalmente a su dinámica, ruido y nula linealidad, factores que no permiten la obtención de imágenes adecuadas para su procesamiento.

Basados en las anteriores observaciones se puede concluir que el astrónomo aficionado tiene dos alternativas: comprar una cámara CCD de algún fabricante especializado o, construir una de partes y componentes que se encuentran disponibles en el mercado. Continuando con el objetivo de este trabajo, exploremos la segunda alternativa dirigiendo nuestra atención hacia un instrumento económico pero de gran capacidad y resolución.

2.1.2 Análisis de las diferentes arquitecturas para cámaras digitales.

En una cámara digital existen en esencia tres tipos de configuraciones básicas llamadas arquitecturas. Algunas son muy potentes, pero extremadamente complejas en su diseño:

otras son muy versátiles, pero costosas y algunas son económicas y no sacrifican su rendimiento. A continuación se detallan sus características.

Arquitectura No. 1

En la figura 2.1 el elemento básico es una memoria para la imagen hacia la cual se envía la imagen CCD digitalizada. Esta memoria se lee por medio de una computadora vía el puerto serial estándar RS-232. La interfase al igual que la memoria para la imagen son manipuladas por un microprocesador. Todo este arreglo puede ser controlado por un microprocesador que contiene memoria dinámica, interfases y un lenguaje. Una de las principales ventajas de este tipo de arquitectura es que la cámara se puede operar con una computadora que tenga una interfase estándar que es el caso de casi todas las computadoras disponibles hoy en día. Estas interfases son muy lentas. Toma alrededor de 3 minutos transferir una imagen de 200 Kbytes a una tasa de 9600 bauds con una interfase RS-232 (1 Baud = 1 bit/segundo en una interfase serial).

La ventaja principal de esta arquitectura es que la memoria de la imagen es independiente de la computadora y por consiguiente se puede diseñar un sistema en el que la imagen pueda ser examinada por la computadora mientras se hace la exposición de la siguiente imagen.

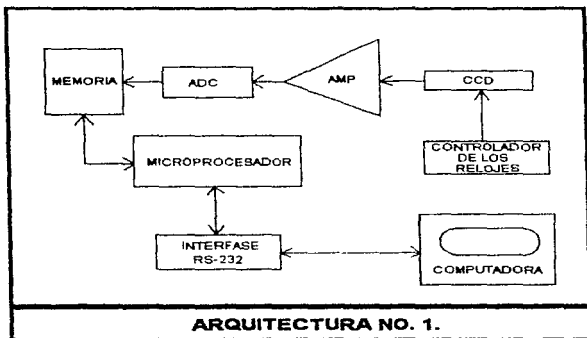


Figura 2.1

Arquitectura No. 2.

En la figura 2.2 al igual que la arquitectura 1, se retiene la memoria de la imagen, pero su lectura se realiza por medio de la computadora con una interfase especial. La interfase puede ser muy rápida, lo que elimina la desventaja de la lentitud en la arquitectura 1.

Si se requiere de funciones especiales, como por ejemplo, un tiempo de integración variable o varias secuencias para los relojes, el diagrama de la electrónica se vuelve más complejo que en el caso de la arquitectura 1. Una manera excelente de simplificar la electrónica es mediante el uso de un EPROM para mantener la secuencia de comandos que se envían al detector CCD. Al incrementar la dirección del bus del EPROM se pueden crear señales de relojes en el bus de datos del EPROM. Debido a que el direccionamiento de los EPROM puede ser cíclico, es posible digitalizar varias exposiciones sucesivamente. Para cambiar el tipo de secuencia de los relojes es necesario modificar la programación de los EPROM.

Esta solución requiere de un programador de EPROM, un dispositivo que es bastante especializado pero no muy caro y sencillo como para poderlo hacer en casa. Los diagramas de programadores de EPROM frecuentemente se publican en revistas de electrónica. Para mejorar la flexibilidad de la arquitectura 2 se puede reemplazar el EPROM por una memoria RAM, cuyo contenido puede ser cargado desde la computadora.

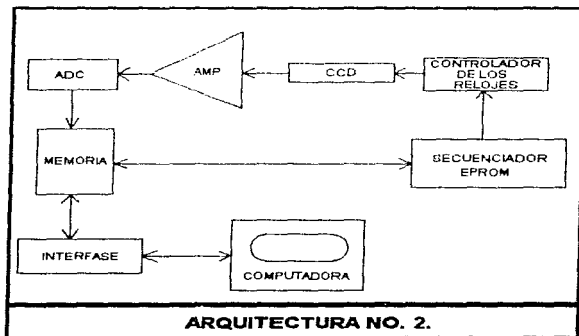


Figura 2.2

Arquitectura No. 3.

En la figura 2.3 la imagen digitalizada se transfiere directamente a la memoria central de la computadora por medio de un canal de acceso directo a la memoria (DMA) o, a través de un circuito paralelo de entrada y salida (PIO = Peripheral input/output). Esta arquitectura depende del tipo de computadora utilizada. Por otro lado, los problemas de transferencia se simplifican debido a un elemento intermedio que es la interfase. La memoria de la imagen se elimina en esta arquitectura. Esta arquitectura es la más sencilla de poner en práctica. Ofrece gran flexibilidad debido a que la computadora misma genera los relojes a través de un software. La operación del detector CCD puede ser modificada al momento de cambiar las líneas en el programa, lo cual es mucho más barato y fácil que alambra circuitos o modificar el contenido de los EPROM.

La velocidad de lectura depende de la velocidad de la máquina usada. Dado que los tiempos de integración utilizados en Astronomía son comúnmente grandes, el tiempo de lectura no es muy crítico, excepto en observaciones solares o planetarias. Otros factores que limitan la velocidad de lectura son ciertos tipos de ruido, los cuales se decrecientan con velocidades de digitalización bajas.

Como resultado, debido a su simplicidad, esta arquitectura es la que adoptaremos para la selección y construcción de la cámara digital.

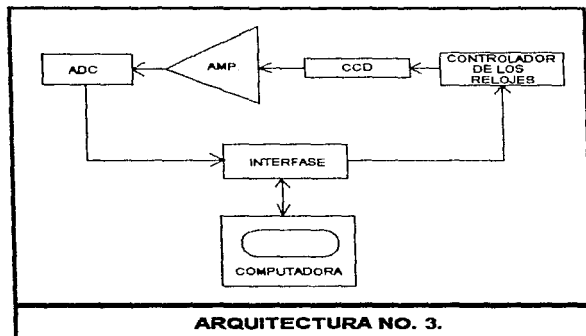


Figura 2.3

2.2 Análisis de cámaras digitales comerciales.

2.2.1 Análisis comercial.

Mundialmente existen cerca de 10 fabricantes de detectores de imagen CCD. Algunos de los más familiares son: Thomson, Tektronix, GEC, Ford Aerospace, Reticon, Kodak, Texas Instruments, EEV y Fairchild. Aunque este número es relativamente pequeño, es verdaderamente suficiente para plantear problemas cuando se trata de seleccionar un detector tipo CCD. Cada fabricante ofrece una amplia variedad de diferentes productos.

La primera consideración en el proceso de selección de un detector CCD es el costo. Una cámara que realice una calidad a nivel profesional requiere de una inversión considerable. Un detector CCD Tektronix de 2,048 X 2,048 pixels tiene un precio de \$10, 500 dólares. Los observatorios profesionales frecuentemente utilizan detectores CCD que fueron específicamente desarrollados para Astronomía y asimismo representan la punta en el mejoramiento tecnológico.

Debido a que el mercado astronómico es muy reducido, los precios de venta de los detectores CCD se extienden al dominio de los cientos y miles de dólares.

Por otro lado, la producción en masa de detectores CCD para propósitos industriales o de consumo general ya es una realidad a precios muy bajos, hasta bajo de los \$ 100 dólares. Sin embargo, no debe esperarse un rendimiento excepcional de este tipo de dispositivos. Las características opto-electrónicas necesarias para Astronomía pueden encontrarse sólo en parte en estos productos baratos. Sus limitantes o mejor dicho sus defectos cosméticos, dinámica reducida, baja sensibilidad, rango espectral limitado, pocos pixeles, pixeles no completamente cuadrados, etc. son problemas cuando el detector se aplica al campo de la Astrofotografía, sin embargo, estos defectos pueden ser corregidos por circuitos suplementarios dentro de la cámara. Afortunadamente para el Astrónomo aficionado o amateur existe un punto medio entre el fabricante que produce en masa y el fabricante que produce a la medida del cliente. La compañía Thomson en Francia y la empresa EEV en Inglaterra se especializan en detectores CCD hechos a la medida del cliente pero realizan una producción suficientemente grande, que los precios son razonables para todo propósito. Este tipo de fabricantes desarrollan componentes primordialmente para imágenes en Medicina, Física nuclear y Astronomía. Sus volúmenes de producción permiten la venta de dispositivos de excelente calidad como el TH7852 con 144 X 208 pixeles a precios cercanos a los \$ 350 dólares. Otro detector CCD de 288 x 384 pixeles, el TH7863 cuesta cerca de \$ 1,000 dólares. Estos precios dependen indudablemente de la calidad deseada y de la cantidad de compra. La empresa Thomson como la compañía GEC también fabrican componentes a la medida del cliente, algunos especialmente para aplicaciones astronómicas como los detectores CCD superdelgados elaborados por Thomson, o bien, los que contienen una capa UV (ultravioleta) fabricados por GEC, sin embargo, los precios de este tipo de componentes son comúnmente prohibitivos para amateurs en el campo de la Astronomía.

CAMARAS DIGITALES COMERCIALES PARA APLICACIONES ASTRONOMICAS			
FABRICANTE	MODELO	RESOLUCION PIXELS	PRECIO DOLARES
SANTA BARBARA INSTRUMENTS GROUP	ST-4	192 X 164	\$890
	ST-4X	192 X 164	\$1,190
	ST-5	320 X 240	\$1,800
	ST-6	375 X 242	\$3,000
	ST-7	765 X 510	\$2,790
COMPUSCOPE	ST-8	1534 X 1020	\$2,450
	CCD800	768 X 512	\$4,995
SIRIUS INSTRUMENTS	CCD1600	1536 X 1040	\$9,995
	CWIP	320 X 200	\$1,299
ELECTRIM CORPORATION	EDC-1000	192 X 330	\$1,090
	EDC-1000TE	192 X 330	\$1,250
	EDC-1000HR	753 X 488	\$1,850
	EDC-1000U	1134 X 972	\$1,250
	EDC-1000C	753 X 488	\$1,950
MEADE	PICTOR 208XT	336 X 242	\$795
	PICTOR 218XT	336 X 242	\$1,195
	PICTOR 416XT	768 X 512	\$2,495
	PICTOR 1616	1024 X 1024	\$6,995
AXIOM RESERCH	AX-1	768 X 512	\$8,000
	AX-4	2048 X 2048	\$10,500
	AX-6	1536 X 1040	\$13,500
HIGH SENSIVITY IMAGING SYSTEM	Hi-SIS22	768 X 512	\$2,500
SPECTRA SOURCE INSTRUMENTS	LYNXX PC	192 X 164	\$990
	LYNXX 2000	336 X 240	\$2,350
	TELERIS	768 X 512	\$3,260
	HPC	1024 X 1024	\$6,500
OPTICAL DESIGN SOLUTIONS	IMG-1300	1300 X 1028	\$5,600
STARLIGHT	XPRESS	500 X 256	\$1,995
HELIUS DESIGN	HELIUS	1152 X 770	\$4,350

Figura 2.4

Para un determinado tipo de detector CCD los fabricantes ofrecen diferentes estratos de calidad correspondientes al número de defectos encontrados en la superficie sensitiva. Entre los problemas más comunes se encuentran los pixeles insensitivos o líneas

insensitivas, pixeles calientes, pixeles oscuros y sensibilidad irregular a lo largo de la superficie.

Además del precio, el tamaño del detector es otro problema de consideración. Inicialmente, uno busca la superficie sensitiva más grande posible, pero esta característica no es necesariamente una ventaja que se pueda explotar efectivamente: la cantidad de información a ser procesada crece geométricamente a medida que el detector CCD se incrementa en tamaño. Una imagen digital de 144 X 208 pixeles codificada en dos bytes contiene cerca de 60 Kbytes (1 Kbyte = 1,024 Bytes), un arreglo de 288 X 384 pixeles representa 220 KBytes, un Tektronix de 2,048 X 2,048 pixeles necesita una capacidad de almacenamiento de más de 8 Mbytes (Megabytes) para una simple imagen. Ford Aerospace ya cuenta con un arreglo aún más grande de 4,096 X 4,096 pixeles.

Texas Instruments por su parte, dentro de los semi-conductores CCD que fabrica se encuentran el TC-211 de 192 X 164 pixeles a un precio de \$ 100 dólares y, el TC-245 de 378 x 242 pixeles a un precio de \$ 155 dólares.

La tabla de la figura 2.4 muestra en resumen una serie de cámaras CCD que se comercializan actualmente para aplicaciones astronómicas, y como podrá observarse resulta un verdadero lujo contar con una herramienta tecnológica como éstas.

2.2.2 Análisis de categorías para astrofotografía amateur.

Desde un punto de vista tecnológico y comercial, de la tabla de la figura 2.4, se pueden establecer rangos o categorías de acuerdo al tamaño y resolución de los semi-conductores CCD utilizados.

La relación de categorías se detalla en el cuadro de la figura 2.5.

RELACION DE CATEGORIA CONTRA PRECIO		
CATEGORIA	RESOLUCION (PÍXELES)	PRECIO PROMEDIO DOLARES
1	192 X 164	\$1,082
2	336 X 242	\$1,930
3	768 X 512	\$3,698
4	1536 X 1040	\$6,434
5	2048 X 2048	\$10,500

Figura 2.5

Aquí se observa que, entre mayor es el tamaño del semi-conductor, mayor es la complejidad del equipo electrónico y como consecuencia mayor el costo de las cámaras. Las cámaras dentro de las categorías 4 y 5 son consideradas de tipo profesional.

Las de categoría 1 y 2 se consideran de carácter "amateur" con las que se pueden realizar trabajos fotográficos y fotométricos serios.

La categoría 3 es un paso intermedio entre lo profesional y lo amateur. El objetivo de este trabajo es mostrar que es posible la construcción de una cámara de fabricación "casera" a un precio muy razonable y con características de operación comparables a cualquiera de las cámaras de su género.

2.3 Selección de la cámara digital.

2.3.1 Elección del semi-conductor CCD.

De un análisis detallado se resumió la tabla de la figura 2.6 en la cual se determinó que es muy complejo y aún muy costoso la construcción de una cámara con características similares a las de categorías 3, 4 o 5, considerando que se trata del desarrollo de una cámara de fabricación casera.

Asimismo, se determinó que la construcción de una cámara con características de categoría 1, resultaría suficientemente económica debido a que no excedería los \$ 395,28 dólares y de manera similar se resumió que la construcción de una cámara de categoría 2 no sobrepasaría los \$ 542.71 dólares.

RELACION DE COSTO DE FABRICACION CONTRA CATEGORIA		
CATEGORIA	RESOLUCION (PIXELES)	COSTO APROXIMADO DE FABRICACION
1	192 X 164	\$395.28
2	336 X 242	\$542.71
3	768 X 512	\$1.368.26
4	1536 X 1040	\$2.541.43
5	2048 X 2048	\$4.714.50

Figura 2.6

Debido a que el semi-conductor CCD utilizado en las cámaras de categoría 2 tiene casi dos veces la resolución y tamaño que el semi-conductor usado en las cámaras de categoría 1, se concluyó que por sólo una diferencia de \$ 147.43 dólares, que corresponde en gran medida a la diferencia en precio entre los semi-conductores de la categoría 2 y la categoría 1, resulta más conveniente la construcción de una cámara de la categoría 2.

Como resultado definitivo se adoptó la construcción de una cámara digital basada en el semi-conductor CCD TC-245 de Texas Instruments debido a que es uno de los semi-conductores más económicos que existen en el mercado dentro de la categoría 2 establecida.

2.3.2 Sub-sistemas básicos que integran la cámara digital.

Después de haber realizado una selección de posibles alternativas de cámaras digitales basadas en la arquitectura no 3 y en el detector de imagen CCD TC-245 de Texas Instruments, se eligió una cámara digital integrada por los siguientes seis sub-sistemas básicos que son:

- 1) El cuerpo de la cámara.
- 2) La electrónica de la cámara.
- 3) La fuente de alimentación.
- 4) El sistema de enfriamiento.
- 5) La computadora
- 6) El software de operación y control.

Las características de estos sub-sistemas se detallan a continuación.

El cuerpo de la cámara.

Es el dispositivo que montado sobre el telescopio reemplaza la operación de un lente ocular. En lugar de que un rayo de luz proveniente del espacio pase por un lente ocular y después incida en el ojo, la luz cae directamente sobre el semi-conductor CCD, el cual se encuentra dentro del cuerpo de la cámara. El propósito del cuerpo de la cámara es el de crear un ambiente seguro y adecuado para la operación de semi-conductor CCD.

El medio ambiente ideal para la operación de un CCD es un lugar frío y seco. Debe proteger al CCD de luz indirecta y de campos eléctricos externos y, permitir al mismo tiempo que la señal que se forma con el telescopio y las señales eléctricas provenientes de la computadora interactúen con el semi-conductor CCD.

El cuerpo de la cámara se eligió de tipo metálico compuesto por un cilindro de aluminio cerrado herméticamente con una ventana al frente para permitir que la luz proveniente del telescopio incida sobre el semi-conductor CCD. Asimismo, el cuerpo de la cámara cuenta también con un sistema de alimentación eléctrica para permitir el paso de señales provenientes de la computadora y, un sistema de enfriamiento para remover el calor generado en la base del semi-conductor CCD.

Dentro del cuerpo de la cámara el CCD descansa sobre un soporte de metal. Un sistema de alambres delgados conectan los pines del CCD al sistema de alimentación eléctrica. Entre la base metálica del CCD y el fondo del cuerpo de la cámara se encuentra un sistema intercambiador de calor denominado sistema Peltier.

Cuando un flujo de corriente eléctrica se aplica al sistema Peltier, este sistema bombea el calor generado de la base del CCD hacia otro sistema intercambiador de calor, compuesto por un recipiente con agua, de modo tal que el CCD pueda permanecer a una temperatura de operación próxima a los -25°C .

Los diseños del cuerpo de la cámara se tomaron de algunos prototipos existentes para el desarrollo de algunas cámaras comerciales.

La electrónica de la cámara.

Aunque el CCD y la computadora son dispositivos electrónicos, no hablan el mismo lenguaje. Los voltajes, corrientes y la velocidad de operación de ambos dispositivos son muy diferentes. La electrónica de la cámara se encarga de realizar un puente de

entendimiento, convirtiendo por un lado, las señales de la computadora en señales que pueden controlar al CCD y, por el otro lado, convirtiendo los voltajes variables del CCD en señales digitales que la computadora puede entender.

El sub-sistema de la electrónica de la cámara está compuesto por dos tarjetas con circuitos impresos. Una de estas tarjetas es la tarjeta pre-amplificadora y se monta dentro de una caja metálica de aluminio misma que se instala sobre el cuerpo de la cámara y, la otra tarjeta, es la tarjeta de interfase que se monta sobre una caja, también metálica, a una distancia de aproximadamente 25 cms de la tarjeta pre-amplificadora. Las dos tarjetas dividen las tareas envueltas en el control del CCD y la transmisión de imágenes a la computadora.

Las tarjetas pre-amplificadora y de interfase se seleccionaron de algunos modelos prototipo existentes en el mercado desarrollados para cámaras comerciales. Estas tarjetas vienen acompañadas de un software de operación y control para el semi-conductor TC-245.

La fuente de alimentación.

La fuente proporciona tres alimentaciones independientes necesarias para la operación de toda la electrónica de la cámara digital.

Una alimentación proporciona la potencia necesaria para los componentes analógicos y digitales, otra alimentación suministra la potencia para la operación de un sistema denominado Peltier, que es un dispositivo intercambiador de calor que se encuentra colocado en el cuerpo de la cámara y, una tercera alimentación que proporciona el voltaje necesario para la operación de la bomba del sistema de enfriamiento.

La fuente de alimentación se seleccionó del tipo externo, es decir, compuesta por un casco o chasis que se pudiera fabricar con madera. La fuente de alimentación se podía realizar de tipo interno, es decir, mediante una tarjeta con circuitos impresos para instalarse en una ranura de expansión de la computadora, sin embargo, su construcción resultaría más costosa y compleja.

Para el diseño de la fuente de alimentación se seleccionaron algunos prototipos existentes y se implementaron con diseños propios.

El sistema de enfriamiento.

Este sistema se utiliza para remover el calor generado por el sistema Peltier mismo que se encarga de mantener una temperatura adecuada de operación del CCD.

Este sistema se seleccionó con base a un enfriamiento con agua que resulta bastante económico y sencillo en su construcción.

Se podría implementar este sistema de enfriamiento en base a aire comprimido o un sistema termoeléctrico pero su construcción es muy compleja y aún más costosa.

El sistema de enfriamiento a base de agua está compuesto por un recipiente con agua (se utilizó una cubeta de 20 litros), un tubo de cobre de 1/4", un sistema de mangueras de plástico de 1/4" y una bomba para limpia-parabrisas utilizadas en los automóviles.

Con este sistema el calor generado por el sistema Peltier que se encarga de mantener al CCD a una temperatura próxima a los -25 °C, se transmite al recipiente con agua y ahí se realiza un intercambio de calor. Se utiliza agua como medio de transmisión del calor.

Al igual que con la fuente de alimentación, se seleccionaron algunos prototipos ya existentes y para su fabricación se implementaron diseños propios.

La computadora.

Para operar la cámara y almacenar las imágenes generadas se requiere de una computadora. La computadora envía las señales de control al CCD y recibe imágenes vía el puerto paralelo de impresión. La computadora debe ser cualquier máquina con un procesador 286 o superior, un disco duro, 2 Mbytes de memoria RAM y un monitor VGA.

El software de operación y control.

El software se adquirió junto con las tarjetas de interfase y pre-amplificadora y contempla todas las instrucciones para la operación y el control del CCD.

En la sección 2.4.5 se especifican todas las funciones de operación del software seleccionado.

2.4 Definición de requerimientos para la cámara.

2.4.1 Fuente de alimentación.

En la figura 2.7 se enlistan los componentes que serán utilizados para la fabricación de la fuente de alimentación.

MATERIALES NECESARIOS PARA LA FUENTE DE ALIMENTACION	
2 TRANSFORMADORES A 12VAC @ 3A	4 PORTAFUSIBLES
1 TRANSFORMADOR A 25VAC @ 450mA	1 FUSIBLE DE 0.75A
2 RECTIFICADORES DE 5A @ 50V	1 FUSIBLE DE 0.25A
1 RECTIFICADOR DE 1.5A @ 50V	1 FUSIBLE DE 1.5A
1 DIODO 1N4001 DE 1A @ 50V	1 FUSIBLE DE 6A
1 CAPACITOR ELEC. 4700uF @ 35V	1 EXTRACTOR DE 3 1/2" @ 120VAC
2 CAPACITOR ELEC. 1000uF @ 35V	3 DISIPADORES DE CALOR DE 8X15CM
2 CAPACITOR CERAMICA 0.1uF	1 DISIPADOR TO-220
1 CAPACITOR CERAMICA 0.1uF @ 50V	2 SWITCHES DE PARED DE 120VAC
1 RESISTENCIA DE 1500 OHMS	1 CUBIERTA DE PARED PARA SWITCHES
1 RESISTENCIA DE 100 OHMS	1 TAPA CON DOBLE CONTACTO 120VAC
1 REGULADOR LM317T	2 MTS. DE ALAMBRE DE ALIMENTACION
1 LED ROJO	3 MTS. DE ALAMBRE CAL. 18 BLANCO
1 RESISTENCIA DE 10K OHMS	3 MTS. DE ALAMBRE CAL. 18 VERDE
1 VOLTMETRO DE 10VDC. PANEL.	3 MTS. DE ALAMBRE CAL. 18 ROJO
1 POTENCIOMETRO 1K OHM	6 JACKS
2 RESISTENCIA DE 1 OHM @ 10W	20 CLAVOS DE 1"
1 POT. DE 1 KOHMS DE 15 GIROS	20 PLAS DE 3/4"
1 PIEZA DE MADERA DE 40X30 CON ESPESOR DE 3/4"	
1 PIEZA DE MADERA DE 40X30 CON ESPESOR DE 1/4"	
2 PIEZAS DE MADERA DE 40X15 CON ESPESOR DE 1/4"	
2 PIEZAS DE MADERA DE 30X15 CON ESPESOR DE 1/4"	
1 BOTE DE PINTURA	
1 BOTE DE PEGAMENTO BLANCO	

Figura 2.7

2.4.2 Electrónica.

En la figura 2.8 se especifican todos los componentes que serán usados para la electrónica de la cámara digital.

ELECTRONICA NECESARIA PARA LA CAMARA	
CAPACITORES: 17 DE 0.1 uF DE CERAMICA 9 DE 4.7 uF A 15 V DE TANTALIO 3 DE 22 uF A 15 V DE TANTALIO 9 DE 100 pF A 50 V DE CERAMICA 4 DE 0.001uF A 50 V DE CERAMICA	CONECTORES: 1 DB-25 MACHO PARA CABLE PLANO 1 DB-25 HEMBRA PARA CABLE PLANO 1 DB-25 MACHO SOLDABLE 1 DB-9 HEMBRA SOLDABLE 1 DB-9 MACHO SOLDABLE 1 SOCKET TRANSPORTADOR DE 16 PIN
RESISTENCIAS: 1 DE 39 KOHMS A 1/4 DE WATT 1 DE 22 KOHMS A 1/4 DE WATT 8 DE 4.7 KOHMS A 1/4 DE WATT 1 DE 2.2 KOHMS A 1/4 DE WATT 1 DE 1.8 KOHMS A 1/4 DE WATT 2 DE 1.5 KOHMS A 1/4 DE WATT 3 DE 1.0 KOHMS A 1/4 DE WATT 8 DE 470 OHMS A 1/4 DE WATT 3 DE 220 OHMS A 1/4 DE WATT 6 DE 150 OHMS A 1/4 DE WATT 13 DE 100 OHMS A 1/4 DE WATT 4 DE 10 OHMS A 1/4 DE WATT 1 POT. DE 1 KOHMS DE 15 GIROS	SEMICONDUCTORES: 1 TC 245-40 1 CONVERTOR ADC AD1674JN DE 12 BITS 2 INVERSORES HEX. 74LS14 2 MULTIPLEXORES 74LS17 1 AMPLIFICADOR LF 358 4 CONDUCTOR DE RELQJ DUAL MOS DS0026 6 TRANSISTORES PNP 2N2907 1 TRANSISTOR NPN 2N3904 1 REGULADOR DE VOLTAJE LM336Z -2.5 1 REGULADOR DE +5V 7805T 1 REGULADOR DE -12V 79L12 1 REGULADOR DE +12V 78L12 1 RFG AJUSTABLE NEGATIVO LM337T 1 REG. AJUSTABLE POSITIVO LM317T 5 DIODOS 1N4001 DE 1 AMP A 50 V
SOCKETS (DIP): 5 DE 8 PIN 2 DE 14 PIN 3 DE 16 PIN 1 DE 28 PIN 2 DE 10 PIN CON SEPARACION DE 0.1"	CABLES: 5 MTS. DE CABLE PLANO DE 25 HILOS 70 CMS. DE CABLE COAXIAL DE 1/8" 4.5 MTS. DE CABLE SPEAKER CALIBRE 18 4.5 MTS. DE ALAMBRE DE INTERCONEXION PARA LA SALIDA +/- 15 VDC 3.0 MTS DE CABLE STRANDED CALIBRE 16 CON AISLANTE DE TEFLON O PVC
DISPOSITIVOS VARIOS: 1 TARJETA DE INTERFASE 1 TARJETA PRE-AMPLIFICADORA 2 DISIPADORES TO-220 1 MODULO PELTIER MELCOR CP 1.4-71-06L 3 SOPORTES PARA TARJETA DE INTERFASE DE 13/16" 1 CAJA DE ALUMINIO DE 7.60 X 13 X 5 CM. 1 JUEGO DE TORNILLOS Y TUERCAS 4-40 1 PASTA PARA AISLANTE	

Figura 2.8

2.4.3 Sistema de enfriamiento.

La figura 2.9 detalla los componentes requeridos para la construcción del sistema de enfriamiento.

MATERIALES NECESARIOS PARA EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	
4 CONECTORES MACHO NPT DE 1/8"	1 CINTA DE TEFLON PARA TUBERIA
2 CONECTORES DE COMPRESION NPT DE 1/8"	1 ROLLO DE SOLDADURA SN60
6 MTS. DE MANGUERA DE VINIL DE 1/4" DE DIAMETRO, TRANSPARENTE	1 JUEGO DE CINTILLOS PLASTICOS
1 BOMBA LIMPIA-PARABRISAS DE 12V UNIVERSAL	2 SOCKET CON SEPARACION DE 0.1"
1 CUBETA DE 20 LTS.	1 TUBO DE SILICON
6 MTS. DE TUBO DE COBRE DE 1/4"	1 BARRA DE PASTA EPOXICA
	1 FRASCO CON ACETONA
	1 PIEZA DE MADERA DE 30X30.ESPESOR 3/4"
	1 FRASCO CON ISOPROPANOL

Figura 2.9

2.4.4 Cuerpo de la cámara

En la figura 2.10 enlistan los componentes que serán utilizados para la fabricación del cuerpo de la cámara.

MATERIALES NECESARIOS PARA EL CUERPO DE LA CAMARA	
1 TUBO DE ALUMINIO DE: 2.373" DE DIAMETRO EXTERIOR 2.073" DE DIAMETRO INTERIOR 1.8" DE LONGITUD	1 HOJA DE ALUMINIO DE: 2.5" DE DIAMETRO DE 0.1" A 0.15" DE ESPESOR
1 TUBO DE ALUMINIO DE: 1.25" DE DIAMETRO EXTERIOR 1.0" DE DIAMETRO INTERIOR 2.5" DE LONGITUD	1 HOJA DE ALUMINIO CUADRADA DE: 6.5" DE LADO 0.030" DE ESPESOR
1 TUBO DE ALUMINIO DE: 2.373" DE DIAMETRO EXTERIOR 3.75" DE LONGITUD	1 ANGULO DE ALUMINIO DE: 0.5" 2.0" DE LONGITUD
	1 TUBO DE ALUMINIO DE: 1.75" DE DIAMETRO EXTERIOR 2.50" DE LONGITUD

Figura 2.10

2.4.5 La computadora.

Se hará uso de una computadora con un procesador 80286 de 20 Mhz, 2 Mbytes de memoria RAM, un disco duro de 120 Mbytes, un monitor monocromático VGA, un puerto paralelo tipo centronics y un puerto serial RS-232.

En este equipo también se procesarán las imágenes digitales obtenidas mediante un programa de procesamiento de imágenes digitales el cual corre bajo Windows.

2.4.6 Software de operación.

El programa seleccionado y conocido como AP245 puede tomar y almacenar imágenes de cuadro completo, medio cuadro y un cuarto de cuadro. Cada tipo de imagen tiene una función diferente y una extensión distintiva, de modo que las imágenes no pueden confundirse.

Las imágenes de cuadro completo contienen un pixel para cada fotocelda del semiconductor CCD. Estas son el tipo normal de imágenes que se tendrán que almacenar. Las imágenes de medio cuadro almacenan sólo la mitad de la imagen, lo que es útil para imágenes planetarias. Cuando se toma una imagen de medio cuadro, la cámara rápidamente cambia la imagen a medio cuadro y la lee normalmente, actuando como si fuera un obturador.

El software puede tomar dos tipos de imágenes de un cuarto de cuadro: para encontrar objetos y para enfocar imágenes. Las imágenes de un cuarto de cuadro se pueden unir mediante el proceso de unión interna de las fotoceldas del CCD para dar superpíxeles, por lo que el área colectiva efectiva proporciona mayor sensibilidad, pero menor resolución de la normal. Con imágenes de un cuarto de cuadro se pueden usar exposiciones muy cortas, típicamente de 1 o 2 segundos, útiles para encontrar objetos muy ténues.

El programa AP245 almacena cada imagen de cuadro completo como dos o tres imágenes parciales.

Imágenes de cuadro completo de 378 X 242 píxeles.

Estas imágenes son almacenadas bajo tres nombres de archivos: *.P1, *.P2 y *.P3. La imagen de cuadro completo contiene 378 X 242 píxeles con dimensiones efectivas de 17 X 19.7 micras. El archivo P1 contiene las líneas 0 a 80, el P2 las líneas 81 a 161 y el P3 las líneas 162 a 251. Cada parte de la imagen contiene 63,007 bytes.

Imágenes de cuadro completo de 252 X 242 píxeles.

Estas imágenes se almacenan en dos archivos nombrados como *.PA y *.PB. Esta imagen de cuadro completo contiene 252 X 242 píxeles con tamaños de 25.5 y 19.7 micras. El archivo PA contiene las líneas 0 a 125 y el archivo PB las líneas 126 a 251. Cada parte del archivo contiene 63,007 bytes.

Imágenes para enfocar de un cuarto de cuadro.

Se almacenan como archivos *.PC. Contienen 126 X 121 píxeles cada uno de 25.5 X 19.7 micras y el archivo es de 30,499 bytes.

Imágenes para encontrar objetos con un cuarto de cuadro.

Se almacenan como archivos *.PC. contienen 126 X 121 píxeles de 51 X 39.4 micras y el archivo es de 30,499 bytes.

2.5 Análisis de costos.

2.5.1 Costos estimados para la fabricación de la cámara.

En la tabla de la figura 2.11 se detalla el costo de todos los componentes utilizados en la fabricación de la cámara digital.

COSTO DE FABRICACION DE LA CAMARA DIGITAL		
SUB-SISTEMA	COMPONENTES ELECTRONICOS (DOLARES)	CUBIERTAS (DOLARES)
FUENTE DE ALIMENTACION. (1)	\$39.30	\$0.00
ELECTRONICA DE LA CAMARA. (2)	\$361.71	\$0.00
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO. (3)	\$52.60	\$0.00
CUERPO DE LA CAMARA. (4)	\$0.00	\$89.10
COMPUTADORA. (5)	\$0.00	\$0.00
SOFTWARE DE OPERACION. (6)	\$0.00	\$0.00
SUB-TOTALES:	\$453.61	\$89.10
COSTO TOTAL DE FABRICACION:		\$542.71
(1) INCLUYE TODO EL MATERIAL DETALLADO EN LA SECCION 2.4.1 (2) INCLUYE TODO EL MATERIAL DETALLADO EN LA SECCION 2.4.2 (3) INCLUYE TODO EL MATERIAL DETALLADO EN LA SECCION 2.4.3 (4) INCLUYE TODO EL MATERIAL DETALLADO EN LA SECCION 2.4.4 (5) SE CUENTA CON UNA COMPUTADORA 286. (6) SE INCLUYO CON LA COMPRA DE LAS TARJETAS SECCION 2.4.2		

Figura 2.11

Como puede observarse, se disminuyeron enormemente algunos costos de fabricación, como por ejemplo, el casco de la fuente de alimentación se elaboró con trozos de madera existentes en casa. Para el sistema de enfriamiento se utilizó una cubeta y madera, y las cajas de protección para las tarjetas de interfase se fabricaron con pedazos de aluminio que había en casa también.

2.6 Teoría de operación del semi-conductor CCD TC-245.

2.6.1 El Semi-conductor TC-245.

Aunque todos los semi-conductores CCD trabajan de acuerdo al mismo conjunto de principios, la arquitectura de las cámaras CCD puede ser confeccionada para imágenes científicas, rastreo de imágenes, videoimágenes o muchas otras aplicaciones.

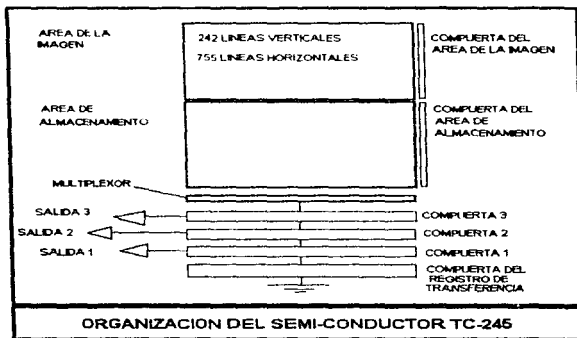


Figura 2.12

La manera más simple de organizar un CCD es como un dispositivo de cuadro completo, sin embargo, existe un problema asociado con el dispositivo de cuadro completo, la luz continúa cayendo en el semi-conductor mientras se toma lectura de éste. Esto baja el contraste de la imagen. Para evitar lo anterior, los diseñadores de semi-conductores CCD algunas veces optan por cubrir la parte baja del semi-conductor con una cubierta opaca. Al pasar la imagen de la parte alta del semi-conductor a la parte baja, el bajo contraste se elimina. El semi-conductor TC-245 es un dispositivo de transferencia de cuadros. Para videocámaras que deben operar a altas velocidades, los diseñadores de semi-conductores CCD optan por construir dispositivos de transferencia de interlíneas. Bajo este diseño, las filas alternas de fotoceldas se cubren con una cubierta opaca y se extienden compuertas

especiales a lo largo del semi-conductor CCD para leer su información. Finalmente, muchos semi-conductores CCD se diseñan para aplicaciones en color.

En el semi-conductor TC-245 para prevenir el bajo contraste de la imagen, la parte expuesta del semi-conductor se transfiere a un área de almacenamiento temporal que se protege de la luz mediante una cubierta de aluminio opaca. En el TC-245 la imagen se transfiere a una tasa de 40 microsegundos por línea, de modo que toma cerca de 10 milisegundos transportar la imagen completa al área de almacenamiento temporal. Aunque el TC-245 es monocromático, el TC-244 tiene una cubierta de color dentro de su estructura.

El área útil para la imagen en el TC-245 es de 755 fotoceldas horizontales X 242 fotoceldas verticales. Cada fotocelda mide 8.5 micras horizontalmente X 19.7 micras verticalmente.

Al combinar fotoceldas adyacentes se pueden hacer fotoceldas casi cuadradas que midan 17 micras de ancho por 19.7 micras de alto. Sin embargo, dependiendo de cómo se lee la imagen, las tres filas de fotoceldas pueden pasar a través de amplificadores, cuyas propiedades no sean las adecuadas, produciendo franjas en la imagen final. El TC-245 produce imágenes libres de franjas de 378 píxeles de ancho debido a que la imagen entera se lee por un solo amplificador. Para la más alta resolución de imágenes se utiliza este proceso. Para una operación normal de TC-245, se unen fotoceldas adyacentes en grupos de tres. Esto da 252 píxeles horizontales X 242 píxeles verticales. En el diseño, la información de cada superpíxel de 25.5 micras de ancho X 19.7 micras de alto pasa por el mismo amplificador. Las imágenes de 252 X 242 encajan con el ancho de resolución de la tarjeta de video VGA de 320 X 200, sin embargo, debido a que la altura de la imagen excede la del monitor estándar, se recombina la imagen y se despliega una imagen de 252 X 193 píxeles en la pantalla. Esto se hace solo para mostrar la imagen, los datos originales en el formato de 252 X 242 píxeles están en la memoria de la computadora.

Para una máxima flexibilidad, el programa de control del detector CCD debe poder leer la imagen en cuatro maneras diferentes que son: a) Uniendo fotoceldas adyacentes internas (en el semi-conductor). b) Uniendo fotoceldas adyacentes externas (en la computadora). c) Uniendo fotoceldas internamente mientras se modifica el voltaje de referencia y d) Uniendo fotoceldas externamente para producir una imagen de 378 píxeles de ancho.

2.6.2 Detección de carga en el TC-245.

Cuando los paquetes cargados del arreglo de fotoceldas del CCD alcanzan el registro de salida, los electrones se convierten en una señal. Esto se lleva a cabo en una estructura llamada el nodo de detección de carga, que básicamente es un amplificador en el semi-conductor.

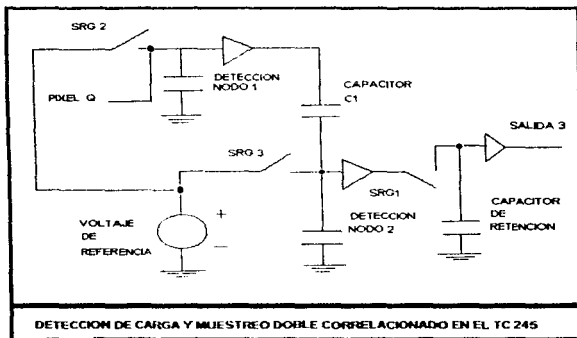


Figura 2.13

El TC-245 tiene tres amplificadores sensitivos a la carga, construidos sobre el mismo semiconductor. Para el TC-245 el ruido de reset se elimina debido a que cuenta con una circuitería especial llamada muestreo doble correlacionado. El muestreo doble correlacionado lo realiza un circuito capacitivo en el TC-245.

Así es como trabaja en detalle: El circuito de detección tiene tres switches de transistores, cada uno controlado por uno de los tres relojes SRG. Cuando su reloj asociado SRG está a un nivel alto, cada switch se cierra, y cuando el reloj SRG está en un nivel bajo, este se abre. Los relojes se denominan SRG1, SRG2 y SRG3. Cuando SRG2 está a un nivel alto, el nodo 1 de detección se conecta al voltaje de referencia Vref. Cambiando el SRG2 a un estado bajo, hace que se coloque el voltaje de reset en el nodo 1 de detección, así que su voltaje se vuelve $V_{ref} + V_{reset}$.

Entonces el reloj SRG3 se pone en un estado alto y el capacitor C1 tiene el voltaje V_{ref} en un lado y el voltaje de detección del nodo 1, en el otro lado. Así, el voltaje a través del capacitor C1 es $-V_{reset}$. El capacitor C1 sirve así, para almacenar el valor inicial del voltaje de reset. SRG3 se pone entonces en una condición de estado bajo y el nodo de detección A2, nodo 2 se desconecta de V_{ref} , así que el extremo de C1 queda abierto. Entonces una carga del registro Q, se vacía en el nodo 1 por la transición alta y baja de SRG3. El nodo 1 ahora tiene un potencial de $V_{ref} + V_{reset} - Q/C$. El voltaje que cae en C1 es V_{reset} , así que el voltaje en el extremo abierto del capacitor es $V_{ref} - Q/C$. Este es ahora el valor que

deseamos conservar. Para prevenir que C1 se descargue, se conecta un amplificador al nodo.

Cuando SRG1 se pone en un estado alto, el voltaje se transfiere al capacitor $C_{mencion}$. Este voltaje permanece en la salida aún cuando SRG1 regrese a una condición de estado bajo y no cambia hasta que SRG1 se ponga alto otra vez. Aunque suena complejo, el TC-245 hace la tarea difícil por nosotros. Nuestro trabajo es alimentar a SRG1, SRG2 y SRG3 con las señales de control adecuadas. El beneficio de la complejidad debida al muestreo doble correlacionado es que el TC-245 se hace considerablemente más sensitivo.

2.6.3 Obtención de imágenes.

La obtención de imágenes con el semi-conductor CCD puede ser llevada a cabo mediante una variedad de técnicas. Debido a que la cámara utiliza la computadora para controlar cada operación del CCD, se pueden abordar los métodos de obtención de imágenes relativamente fácil. Cada método tiene ciertas ventajas y desventajas.

La forma más sencilla de obtener una imagen es mover cada línea hacia abajo, y entonces mover serialmente hacia afuera los paquetes cargados de cada fotocelda. En este método se obtiene la intensidad total de la imagen. En el TC-245 no se lee la información con este procedimiento porque las fotoceldas rectangulares ocasionarían una imagen normalmente estirada. En su lugar, se unen las fotoceldas en grupos de dos o tres fotoceldas.

2.6.4 Unión interna.

Al combinar fotoceldas adyacentes y líneas adyacentes en el semi-conductor CCD, se puede mejorar la razón señal a ruido y la sensibilidad a la luz de la cámara. Sin embargo, por esta ganancia se debe perder resolución y rango dinámico del semi-conductor. El incremento en la sensibilidad hace a la cámara extremadamente útil para localizar objetos muy ténuas antes de hacer una exposición.

La unión vertical es fácil de llevar a cabo en el TC-245. Cuando las líneas se mueven al extremo del registro de la imagen, los electrones se apilan, a menos que se muevan al registro serial. La unión horizontal no es posible con el TC-245, la unión horizontal se limita a combinar las tres columnas. La unión adicional de fotoceldas horizontales puede realizarse añadiendo los datos obtenidos en la computadora.

Aunque las imágenes unidas internamente se pueden leer muy rápidamente, los múltiples paquetes de carga se combinan en un simple paquete cargado, sobresaturando la carga y ocasionando fluorescencia a la unión interna de fotoceldas.

2.6.5 Unión externa.

Se realiza por medio del software, a medida que se lee la imagen. Este proceso da un rango dinámico mucho mayor que la unión interna. Esto ocurre porque los registros seriales no combinados no se saturan rápidamente. Sin embargo, debido a la saturación, el máximo tiempo de exposición útil con la unión interna en el TC-245 es de cerca de 5

minutos, pero con la unión externa el TC-245 puede tomar exposiciones de hasta 15 minutos.

La unión externa normalmente se lleva a cabo cambiando las líneas de fotoceldas 1, 4, 7 10 hacia el registro serial, y leyendo posteriormente esta línea de 252 paquetes cargados. Después de que se lee esta línea, la siguiente columna se mueve hacia el registro serial y se leen las líneas de fotoceldas con los números 2, 5, 6, 11. Finalmente, la última columna de fotoceldas, números 3, 6, 9, 12 etc. se mueven al registro serial y se leen. Esta información se almacena y se combina externamente en la computadora para escribir el valor de cada pixel en el lugar propio en el arreglo de la imagen de 252 X 242 pixeles. La línea de fotoceldas se puede unir también en 378 pares de pixeles para producir una imagen de 378 X 242 pixeles con un poco más de resolución horizontal que la del formato estándar. Se lee el registro tal como se hace el modo de lectura para unión interna, pero la información se almacena y se combina de diferente forma en la computadora para producir la imagen de 378 pixeles de ancho. La principal desventaja de la unión externa es que toma más tiempo leer los datos de la imagen del semi-conductor. Sin embargo, debido a que el tiempo de lectura para la unión externa es solo un problema de segundos, la unión externa es preferible a la unión interna para la localización de objetos celestes muy ténues.

2.6.6 Unión externa e interna combinadas.

La combinación interna y externa en el TC-245 produce imágenes de un cuarto de cuadro útiles para el modo de búsqueda de objetos ténues. Con las imágenes combinadas se pueden detectar objetos muy débiles con exposiciones de sólo unos pocos segundos.

2.6.7 Muestreo doble.

Un método poderoso para reducir el ruido durante la lectura es el muestreo doble. El ruido se remueve al sustraer el voltaje de la señal de referencia de la señal en la fotocelda. En el intervalo de 20 microsegundos entre el muestreo de la señal y el muestreo del voltaje de referencia, las fuentes de ruido de baja frecuencia permanecen constantes. Este modo permite al semi-conductor TC-245 operar bajo condiciones adversas para eliminar parte del ruido térmico. En la operación del TC-245, el modo de lectura de muestreo doble lo maneja el software.

2.7 Electrónica de Soporte.

2.7.1 Paso de las señales de tiempo al CCD.

Dos tarjetas de circuitos, la tarjeta de interfase y la tarjeta pre-amplificadora soportan la operación del semi-conductor CCD. Estas tarjetas tienen cuatro funciones básicas: 1) pasar señales de tiempo desde la computadora al semi-conductor CCD, 2) suministrar los

voltajes necesarios al CCD, 3) invertir y digitalizar la señal analógica del CCD y 4) pasar la señal digitalizada a la computadora. Estas cuatro funciones son compartidas por las dos tarjetas.

La computadora controla al semi-conductor CCD a través del puerto de impresión paralelo. El puerto de impresión opera a una velocidad muy alta. El texto se envía al puerto de impresión usando señales con lógica TTL (Transistor-Transistor Logic). Cada byte de datos que va a la impresora se envía simultáneamente en los 8 alambres del cable de impresión.

El software usa cada uno de los 8 bits para controlar una sola función. El TC-245 requiere de nueve líneas de control: los ocho bits de datos y una línea de control de dispositivo adicional. La compuerta del área de la imagen IAG y la compuerta del área de almacenaje SAG requieren de dos líneas y las compuertas de los registros seriales SRG y las compuertas del registro de transferencia TRG requieren de cuatro más. Se necesitan dos líneas más para manejar el regreso de datos y la novena línea se necesita para iniciar la conversión analógico/digital del semi-conductor 74LS14. Este semi-conductor invierte las señales haciendo On las señales Off, y viceversa. Las señales del 74LS14 viajan a través de un cable muy corto hacia la tarjeta pre-amplificadora, donde dichas señales se usan como entradas para los semi-conductores lógicos que están en la tarjeta pre-amplificadora.

2.7.2 Suministro de voltajes para el CCD.

Cinco reguladores de voltaje en la tarjeta de interfase convierten los +/- 15 Volts de la fuente de alimentación en los voltajes regulados requeridos por el CCD. Estos voltajes son $+12 V_{DC}$, $-12 V_{DC}$, $+5 V_{DC}$, $-9.5 V_{DC}$ y $+2.3 V_{DC}$.

El voltaje $+5 V_{DC}$ alimenta los semi-conductores lógicos y el semi-conductor conversor analógico/digital. El valor $+12 V_{DC}$ se suministra al convertidor analógico/digital. Los valores $-9.5 V_{DC}$ $+2.3 V_{DC}$ son manipulados por los semi-conductores lógicos en la tarjeta pre-amplificadora para manejar las compuertas IAG, SAG y SRG.

2.7.3 Inversión y digitalización de la imagen.

Cuando el semi-conductor CCD está en total obscuridad, la señal de salida del semi-conductor es de aproximadamente 4 Volts y disminuye a medida que incide más luz sobre el semi-conductor CCD. Tan pronto como la señal entra a la tarjeta pre-amplificadora va a través de un transistor que opera como un seguidor de voltaje unitario. Este transistor reproduce cualquier voltaje que se le administre y coloca una carga mínima en el amplificador de salida del CCD.

El conversor analógico/digital, sin embargo, necesita señales que lleguen positivas para niveles más altos. La salida del transistor se pasa a un amplificador operacional que sustrae los 4 Volts de offset de la señal. La cantidad del offset se ajusta con el potenciómetro de 15 vueltas que está en la tarjeta pre-amplificadora.

El amplificador operacional se pone a operar con una ganancia negativa, es decir, invierte la señal del voltaje y la multiplica por la ganancia. Debido a que el rango de salida del TC-

245 es de 0.4 Volts aproximadamente, el amplificador tiene una ganancia de -18. La salida analógica alimenta al convertor analógico/digital y por lo tanto varía de 0 a $+10 V_{DC}$. Cuando se presenta una señal entre 0 y +10 Volts, el AD1674JN regresa un número de 12 bits entre 0 y 4095 o un número binario 0000 0000 0000 y 1111 1111 1111. La conversión toma cerca de 10 microsegundos, es decir, un lapso de 10 microsegundos antes de que las señales de niveles lógicos binarios aparezcan en los doce pines de salida del convertor analógico/digital.

2.7.4 Regreso de la imagen a la computadora.

Una vez que la imagen es digitalizada, se debe enviar a la computadora. Desafortunadamente, el adaptador de impresión puede recibir sólo cuatro bits a la vez. En la tarjeta de interfase, un circuito multiplexor descompone los datos en tres grupos llamados nibbles de 4 bits cada uno y entonces, cada nibble se regresa a la computadora usando los pines 10 a 13 del cable paralelo. Bajo el control de dos bits de entrada, cada semi-conductor multiplexor de la tarjeta de interfase selecciona los datos de una de las dos entradas y envía los datos seleccionados a su salida. El programa de obtención de imágenes en la computadora controla qué bits se envían y por lo tanto, qué bits regresa a la computadora el multiplexor. Tan pronto como se han recibido los 3 nibbles, el programa de obtención de imágenes combina estos bits en un entero entre 0 y 4095. Así la computadora recibe una salida digitalizada de una fotocelda en el TC-245.

2.7.5 Software de control para el TC-245.

Para el control del TC-245 una computadora convencional es capaz de generar todas las señales de reloj y pasarlas al TC-245 a través del puerto de impresión paralelo. Dentro del software AP245, la generación de las señales de reloj se llevan a cabo usando una combinación del lenguaje ensamblador y el Quick Basic.

Para el control del TC-245 el área de la imagen y el área de almacenamiento se limpian antes de la lectura y las fotoceldas se unen (interna o externamente) durante la lectura.

El área de la imagen se limpia al mover el área de la imagen al área de almacenamiento usando los tres registros señales. Para unir las tres fotoceldas internamente, la compuerta TRG recibe señales de reloj tres veces y así combina las fotoceldas para la unión externa, se leen tres líneas y se suman en la computadora.

CAPITULO 3.
Diseño de la cámara digital.

3.1 Diseño de la fuente de alimentación.

3.1.1 Qué hace la fuente de alimentación

La fuente de alimentación proporciona los voltajes y la potencia necesarias para la operación de la cámara digital. La fuente de alimentación suministra tres sistemas de alimentación independientes. Potencia para la electrónica, potencia para el sistema Peltier de la cabeza de la cámara y potencia para la bomba de enfriamiento. Adicionalmente, la fuente cuenta con dos salidas de 120 volts AC para proporcionar potencia a la computadora y al telescopio.

Transformadores de potencia reducen el voltaje de entrada de 120 volts de corriente alterna a 12 volts y 25 volts de salida de corriente alterna. Esta corriente de salida se rectifica para producir un voltaje de corriente directa DC y se filtra para remover el resto del voltaje AC. A través de este desarrollo se manejará el término V_{CA} como voltaje de corriente alterna y V_{DC} como voltaje de corriente directa.

3.1.2 Cómo trabaja la fuente de alimentación.

La alimentación para la bomba de refrigeración tiene la circuitería más simple porque los requerimientos de dicha bomba son los menos demandantes. A causa de que la bomba puede operar perfectamente bien con una corriente directa sin una rectificación exacta, la corriente alterna de la parte central de uno de los transformadores de 120 volts a 3 amperes se pasa a través de un diodo. Este diodo que es un 1N4001 bloquea el flujo de corriente en una dirección mientras permite el paso de la corriente hasta de 1 ampere, en la otra dirección. Un capacitor electrolítico de 1,000 microfaradios empareja la mayoría del voltaje restante y, por consiguiente, el resultado es una aproximación satisfactoria de corriente directa para alimentar la bomba.

La alimentación para el sistema refrigerante es el circuito más sofisticado en la fuente, porque debe proporcionar un voltaje regulado y ajustable. Se necesitan dos transformadores de 120 volts a 3 amperes para operar este dispositivo de alta corriente y bajo voltaje.

Se podría haber usado un solo transformador de 6 amperes, sin embargo, los transformadores de 3 amperes son fabricados más comúnmente.

Dos rectificadores de puente de 5 amperes proveen capacidad de manejo de potencia para convertir una onda senoidal de corriente alterna, de los transformadores, en una salida de corriente directa rectificada de onda completa y dos capacitores electrolíticos de 4,700 microfaradios emparejan la mayoría del voltaje de salida sobrante. Los rectificadores de puente producen una considerable pérdida de calor, por lo que se montan sobre un disipador de calor grande. La sección de regulación utiliza un regulador de voltaje ajustable LM317T para producir un voltaje de referencia exacto en la base del transistor de potencia 2N3055. El transistor de potencia opera como un emisor para hacer subir la capacidad de corriente del regulador.

Cuando se regula la señal filtrada de corriente directa de los transformadores, el transistor 2N3055 disipa una gran cantidad de calor, por lo que dicho transistor también debe ser montado sobre un disipador de calor grande. El tamaño del disipador de calor necesario se redujo por medio de la disipación de calor que proporcionan las dos resistencias de potencia de 1 ohm a 10 watts. Un fusible de 6 amperes protege la fuente de cortos circuitos accidentales.

Para operar la electrónica tanto en la tarjeta de interfase como en la tarjeta pre-amplificadora, la tercera fuente de alimentación produce voltajes de corriente directa de +15 volts y -15 volts

filtrados, pero no regulados. La regulación de los voltajes requeridos para la circuitería de la cámara se realiza dentro de las mismas tarjetas de interfase y pre-amplificadora.

El suministro para operar la electrónica se basa en el uso de dos transformadores de 25 volts a 450 miliamperes (los amperes pueden cambiar segun el transformador que se consiga)

En estos circuitos los rectificadores de puente convierten la salida del secundario del transformador en una salida rectificada de onda completa. Debido a que el centro del transformador se conecta a tierra, se obtienen dos salidas de onda completa, una salida de +15 volts y otra salida de -15 volts. La resistencia interna del transformador se usa con un capacitor de 4,700 microfaradios para producir el voltaje sobre las salidas + y - a un nivel de operación aceptable para los componentes de regulación de voltaje que se encuentran dentro de la circuitería de la cámara.

El casco de la fuente de alimentación se diseñó de madera tipo triplay de 1/2" para la base y de 1/4" para los costados y la parte superior.

El casco cuenta con cuatro paneles: el panel de AC, el panel de CD, el panel de ventilación y, el panel de extracción.

3.1.3 Diagramas del diseño de la fuente de alimentación.

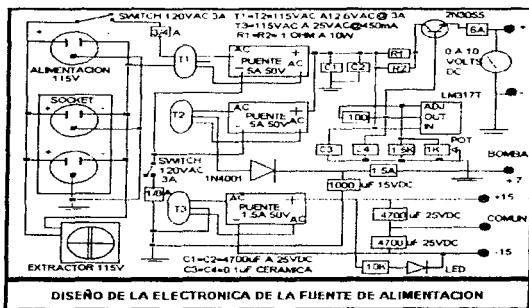


Figura 3.1

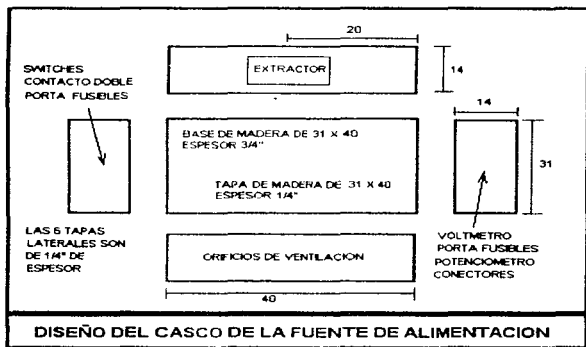


Figura 3.2

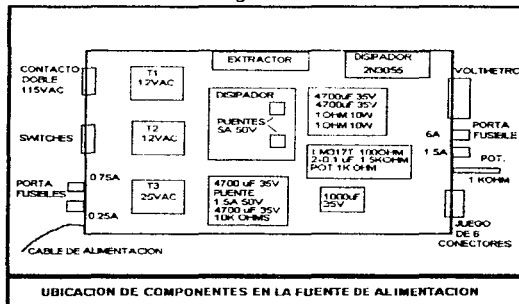


Figura 3.3

3.2 Diseño de la interfase de la cámara.

3.2.1 Qué hace la tarjeta de interfase.

La tarjeta de interfase sirve como liga entre la computadora y el cuerpo de la cámara. La interfase transfiere señales de la computadora, que le dicen a la cámara qué hacer con los voltajes que la electrónica en el cuerpo de la cámara recibe, y convierte la imagen del semi-conductor CCD en un formato digital que la computadora entiende. Adicionalmente, contiene circuitos que generan los voltajes necesarios para la operación del CCD.

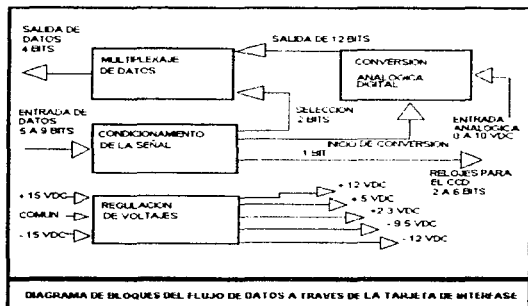


Figura 3.4

3.2.2 Como trabaja la tarjeta de interfase.

El software de operación de la cámara funciona como el cerebro de la misma. Envía comandos u órdenes a la cámara a través del puerto paralelo de la computadora. El puerto de impresión paralelo de la computadora no está diseñado para controlar la cámara; sus señales contienen voltajes y características diferentes. La tarjeta de interfase hace que se entiendan el puerto de impresión paralelo y la electrónica de la cámara CCD. Específicamente, la interfase realiza las siguientes cuatro funciones básicas:

- 1) Remueve el ruido y reestablece las señales correctamente.
- 2) Por medio de un convertidor analógico/digital en la tarjeta de interfase, transfiere la señal analógica del semi-conductor CCD a una representación binaria de 12 bits.

- 3) Descompone la señal de 12 bits del convertidor analógico/digital en tres segmentos de 4 bits cada uno, para transmitirlos a la computadora. El adaptador de impresión en la computadora obtiene los segmentos del número binario de 4 bits en tres fases.
- 4) Genera los niveles de voltaje regulado de la fuente de alimentación no regulada de +15 V_{DC}. Estos voltajes son de +5 V para la circuitería digital, +12 V, -12 V y -9.5 V para la circuitería analógica y +2.3 V y -9.5V para los relojes del CCD.

3.2.3 Operación de las señales de control.

La cámara utiliza la tarjeta de impresión de la PC como una interfase de control. El adaptador de impresión envía datos de control a la cámara y recibe datos de la imagen CCD desde la cámara. Las señales de datos consisten de ocho bits de datos individuales, los cuales forman un byte de datos. Los ocho bits para cada byte de datos se envían simultáneamente como voltajes.

Cada señal lógica TTL representa un bit y puede ser una señal baja (0) o una señal alta (1). Los niveles lógicos se definen de la siguiente manera:

Lógica baja es un voltaje entre 0.00 V y 0.40 V.

Lógica alta es un voltaje entre 2.40 V y 5.00 V.

Cuando la impresora recibe señales desde la computadora, esta sensa los niveles de voltaje. La mayoría de las impresoras tratan cualquier voltaje abajo de 1.5 V como una señal de nivel lógico baja y, cualquier voltaje arriba de 1.5 V como una señal de nivel lógico alta. Las tarjetas adaptadoras de impresión estándar usan el componente 74LS374 que es un dispositivo octal flip-flop tipo D para conducir las líneas de salida de datos de ocho bits hacia la impresora. La interfase del puerto de impresión de la cámara está diseñado para trabajar con una tarjeta adaptadora de impresión genérica que utiliza el dispositivo 74LS374.

El adaptador de impresión envía datos de salida a través de un bus I/O (de entrada y salida) que se encuentra dentro de la computadora. El programa de control utiliza una operación de salida OUT para colocar los datos en el bus de datos de la computadora.

Para prevenir que otros dispositivos respondan a datos de entrada y salida I/O en el bus, la computadora usa el bus con la selección adecuada. El flip-flop tipo D que está en el adaptador de impresión solo recibe los datos cuando su dirección seleccionada se coloca en el bus. La dirección del adaptador de impresión puede variar dependiendo de la tarjeta adaptadora. Las direcciones de salida del puerto de datos se identifican como:

LPT1: 378 hex

LPT2: 278 hex

Se puede usar cualquier puerto indistintamente. Si se tiene una tarjeta adaptadora de video monocromática, la dirección del puerto de salida de LPT1 es 3BC hex.

Las señales de salida del adaptador de impresión se encuentran en un conector hembra de 25 pines en la computadora. Las señales eléctricas que representan los datos en ocho bits se localizan en los pines 2 al 9 en el conector.

Como en los circuitos eléctricos, el nivel de voltaje de los bits de datos se mide con respecto a otro nivel de voltaje. En los adaptadores de impresión estándares, el voltaje de referencia de la salida de datos es el nivel de tierra, pines 18 a 25.

Para comunicarse con el adaptador de impresión, el programa de control debe enviar datos al puerto de salida en un formato de bytes. Para simplificar la codificación, la posición de los bits en

el byte, el peso del bit se usa como un nivel lógico. La relación entre el peso del bit y el conector DB25 se muestra en la siguiente relación:

DB25	Peso del Bit
2	1
3	2
4	4
5	8
6	16
7	32
8	64
9	128

Para enviar un caracter, el adaptador de impresión coloca un nivel del voltaje en cada uno de los pines. Para enviar el caracter "A" que tiene un valor ASCII de 65, los pines 2 y 8 se ponen en un nivel de lógica alto. Los pines 3, 4, 5, 6 y 7 se ponen en un valor de lógica bajo.

Para encontrar qué caracteres han sido enviados, la impresora suma el peso del bit de los niveles lógicos altos. El pin 2 tiene un peso de bit de 1, y el pin 8 tiene un peso de bit de 64. Su suma es de 65, que corresponde al caracter ASCII "A". Así es como la letra "A" se envía de la computadora a la impresora.

Vamos a seguir una señal del adaptador de impresión a la cámara. La salida de datos del adaptador de impresión usualmente se conecta a un cable plano que puede ser de hasta 3 mts. de longitud. Aunque un cable que transporta potencia puede ser virtualmente de cualquier longitud, un cable que transporta una señal de voltaje lógico desde el adaptador de impresión es diferente, a causa de que los voltajes cambian más rápidamente. La mayoría de los adaptadores de impresión pueden cambiar de un estado uno lógico a cero lógico en solo 60×10^{-9} segundos y algunos pueden cambiar aún más rápido.

Cuando el adaptador de impresión cambia un nivel lógico, la transición eléctrica desde un uno lógico a un cero lógico a través del cable dura aproximadamente 2 nanosegundos por cada 30 cm, es decir, 2×10^{-9} seg por cada 30 cm. Cuando alcanza el extremo del cable, se refleja de regreso con una polaridad negativa, de modo que un voltaje de 3.5 V se refleja como una señal de -3.5 V. En un cable de 3 metros una señal regresa en 60 nanosegundos.

La señal va y regresa del cable perdiendo energía en cada rebote. El resultado es que la impresora ve una oscilación al final del nivel lógico. Este efecto se llama "timbrado". Si el tiempo en el que la señal hace un viaje redondo, ida y vuelta, es menor que el tiempo de transición de la señal lógica, el efecto de timbrado altera mucho a la señal original. Sin embargo, si el tiempo de transición es mucho más corto que el de timbrado de la señal, la compuerta lógica si puede responder al timbrado.

Cada vez que la señal rebota, esta puede causar otra transición lógica del estado de lógica alta al de baja. En la cámara, estas señales controlan la operación del semi-conductor CCD. Si la señal normalmente causa que el CCD cambie una línea de datos, el timbrado puede ocasionar que la línea de datos cambie dos o tres veces.

La solución al problema del timbrado es colocar en el extremo del cable un circuito que reduzca la cantidad de reflexión. Si el extremo del cable se termina con un circuito con una impedancia aproximada de 115 Ohms, la señal se absorbe en lugar de ser reflejada y el efecto timbrado se minimiza. En el diseño de la cámara, la red terminal, que consiste de una resistencia en serie de

100 Ohms y un capacitor aterizado de 100 pF, reduce el problema de timbrado a un valor cercano a los 35 nanosegundos.

TABLA DE ASIGNACION DE BIT			
ASIGNACION DE BIT EN UNA PALABRA DE 12 BITS	PIN 1 SELECCION DEL NIVEL U3	PIN 1 SELECCION DEL NIVEL U4	ENTRADA DE PIN EN CONECTOR DB-25
BIT 11	1	X	11
BIT 10	1	X	10
BIT 9	1	X	12
BIT 8	1	X	13
BIT 7	0	1	11
BIT 6	0	1	10
BIT 5	0	1	12
BIT 4	0	1	13
BIT 3	0	0	11
BIT 2	0	0	10
BIT 1	0	0	12
BIT 0	0	0	13

TABLA DE SELECCION DE NIBBLE			
PUERTO DE DATOS		NIBBLE SELECCIONADO	
b5	b4		
0	1		ALTO
1	0		MEDIO
1	1		BAJO

Figura 3.5

Reducir la señal al final del cable tiene problemas adicionales que pueden hacer infuncional el uso de señales lógicas para manejar la electrónica de la cámara.

Para reducir los efectos de timbrado, ruido y señal baja; la interfase incorpora una compuerta lógica, el 74LS14. El 74LS14 es un inversor hexadecimal, lo que significa que un nivel de salida lógica es alto para una entrada de nivel bajo y bajo para una entrada de nivel alto. En el 74LS14 hay seis compuertas inversoras. Comenzando con la compuerta de salida en un estado de lógica baja, la compuerta no cambiará a un estado de lógica alto hasta que el voltaje de entrada caiga por debajo de 0.8 V. Cambia en aproximadamente 22 nanosegundos, restaurando al mismo tiempo la señal. Sin embargo, la compuerta no cambiará de regreso a un estado de lógica alto hasta que la entrada otra vez caiga a 0.8 V. Este efecto se llama "histéresis de entrada".

La histéresis de entrada ayuda al circuito a ser inmune al ruido, si consideramos una señal con ruido que varía 0.4 V sobre el nivel de la señal (por ejemplo, una variación aleatoria en el voltaje de la señal). Cuando la señal de entrada cae a 1.2 V la compuerta cambiará a una salida lógica alta, porque $1.2\text{ V} - 0.4\text{ V} = 0.8\text{ V}$. Sin embargo, la compuerta no cambiará al estado de lógica bajo del ruido, ya que el nivel de la señal más el ruido es $1.2\text{ V} + 0.4\text{ V} = 1.6\text{ V}$. Si la histéresis de entrada no estuviera presente, entonces la compuerta lógica cambiaría a un punto de voltaje tal como 1.5 V y ocasionaría que la compuerta cambiara de niveles bajo a alto.

Cada bit de salida en el adaptador de impresión se utiliza para manipular un circuito diferente en la cámara. En la tabla de la figura 3.5 se especifica la relación entre cada Bit y cada uno de los pines del adaptador de impresión

3.2.4 Operación de los reguladores de voltaje.

La potencia de la fuente de alimentación de $\pm 15 V_{DC}$ contiene un componente de voltaje de DC y cuando se activa el suministro, este voltaje varía. La regulación de voltaje se requiere para obtener voltajes estables para la electrónica de la cámara. La regulación necesaria se provee a través de cinco reguladores de voltaje que se encuentran en la tarjeta de interfase, mismos que se detallan en la figura 3.6.

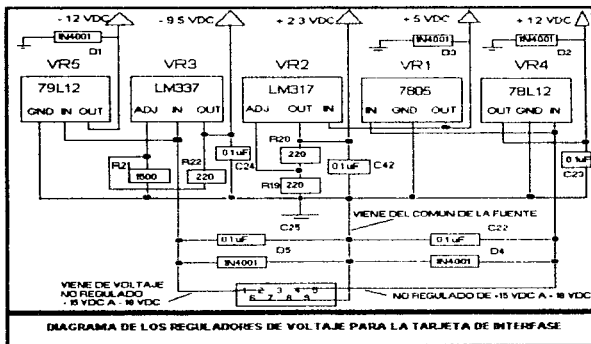


Figura 3.6

Dos tipos de reguladores están presentes en la tarjeta: fijo y ajustable. Cinco reguladores VR5, VR1 y VR4 producen $-12 V_{DC}$, $+5 V_{DC}$ y $+12 V_{DC}$ respectivamente. Los dos reguladores ajustables, VR2 y VR3 se pueden ajustar para valores amba de 1.25 Volts. VR2 es un regulador de voltaje positivo y VR3 es negativo.

Aunque los reguladores mantienen un voltaje de salida constante, los cables que conectan los voltajes regulados a los otros componentes no liberan un voltaje constante.

Los dispositivos atraen la corriente en oleadas que tienen características de alta frecuencia. Los cables actúan como elementos inductivos a altas frecuencias y los voltajes transitorios se generan en respuesta a las corrientes.

Para reducir su inductancia los trazos del circuito son anchos en la tarjeta de interfase.

Los reguladores de voltaje se protegen a sí mismos y a otra circuitería al liberar demasiada corriente. Por ejemplo, el regulador VR1 administra cerca de 250 mA de corriente al TC-245. A causa de que el voltaje de entrada es de $15 V_{DC}$ y el voltaje de salida es de $5 V_{DC}$, el dispositivo disipa 250 mA por 10 V, es decir, 2.5 watts de potencia. La resistencia térmica del chip es de $50^{\circ}C$ por watt. Esto significa que el chip opera a $125^{\circ}C$ arriba de la temperatura ambiente. Si se pone mucho más caliente, no liberará la potencia que el TC-245 requiere. El regulador debe, por lo tanto, acoplarse a un disipador de calor para reducir su temperatura de operación. Los reguladores ajustables VR2 y VR3 se ponen junto a una red externa de resistores. Los voltajes se identifican mediante la ecuación:

$$VR3 \text{ out} = -1.25 V * (1 + (R21/R22)) = -9.77 V$$

$$VR2 \text{ out} = 1.25 V * (1 + (R19/R20)) = +2.50 V$$

Los valores reales fueron diseñados para ser un poco más altos que los valores de $-9.5V$ y $+2.3V$ requeridos. Esta medida permite redondear los valores de salida a los valores exactos necesarios para los circuitos.

Para proteger la electrónica de la cámara contra una conexión accidental a la toma de $\pm 15 V_{DC}$ los diodos D4 y D5 se conectan a las entradas de voltaje. Tres diodos adicionales D1, D2 y D3 colocados a través de tres reguladores protegen a los reguladores.

3.2.5 Digitalización de las señales de la cámara.

Los datos del CCD pasan a través de una tarjeta pre-amplificadora y alcanza la tarjeta de interfase como un voltaje amplificado con un rango nominal de 0 a 10 volts. Esta información se convierte por medio de un convertidor analógico/digital (ADC) a un entero binario de 12 bits cuyo rango de valores es de 0 a 4095. El ADC, el AD1674JN está diseñado para interactuar con el bus del microprocesador. Este dispositivo se usa en un modo stand-alone de 12 bits que requiere solo una señal de control para iniciar la conversión. En la figura 3.7 se muestra el esquema de conversión y operación de la electrónica de la cámara.

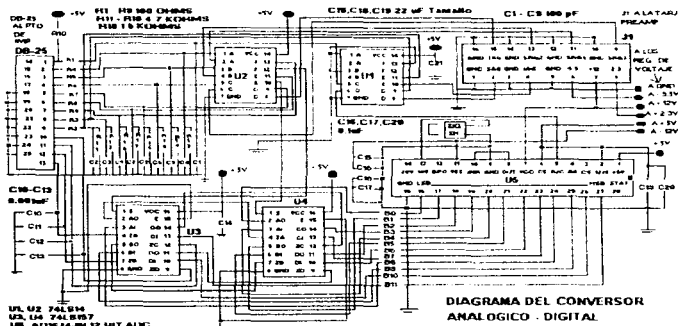


Figura 3 7

Cuando se completa una conversión, un dato de 12 bits aparece en los pines de salida del ADC. Un ciclo de conversión comienza cuando la entrada va de un nivel de lógica alto a un nivel de lógica bajo. Este ADC tiene un circuito integral que muestra los voltajes de entrada al comienzo de la conversión y los mantiene estables durante el ciclo de conversión. Internamente, el ADC opera haciendo aproximaciones sucesivas del voltaje de entrada hasta que la última aproximación empareja al voltaje de entrada.

Cuando se inicia el ciclo de conversión la salida del ADC cambia a un modo de alta impedancia. Este estado de lógica especial permite al convertidor ser acoplado a un bus del microprocesador con otros dispositivos.

3.2.6 Regreso de imágenes.

Una vez que el voltaje de un pixel se ha digitalizado a una precisión de 12 bits, la información se envía a la computadora. Desafortunadamente, a causa de las limitaciones del adaptador de impresión, solo 4 bits se pueden transmitir de un número de 12 bits a la computadora por lo que la tarjeta de interfase envía los 12 bits mediante tres transmisiones sucesivas de 4 bits. El adaptador de impresión usa los pines 10 a 13 como entradas lógicas. En la tarjeta de interfase, un circuito multiplexor descompone los datos en 3 nibbles de 4 bits. Un nibble es la mitad de un byte.

El circuito multiplexor en la tarjeta de interfase está basado en dos 74LS157. Cada uno de estos chips tiene 4 switches multiplexores separados. Los switches seleccionan los datos de una o dos entradas y envían los datos seleccionados como su salida.

Las líneas seleccionadas multiplexadas son manejadas por inversores en el 74LS14 conectados a los bits de datos del adaptador de impresión. De esta manera, el circuito multiplexor es controlado mediante un programa de control desde la computadora. Los datos convertidos a nibbles de 4 bits se envían a la computadora. Las salidas del 74LS157 se cargan por medio de capacitores para disminuir las tasas de transmisión de niveles lógicos cerca de 150 nseg. El programa de control de la computadora lee los datos de la cámara a través de las entradas de la interfase del puerto de impresión. Cuando los 3 nibbles son recibidos desde el puerto de impresión, el programa de control combina los datos a un formato de enteros de 16 bits.

3.2.7 Diagramas del diseño de la tarjeta de interfase.

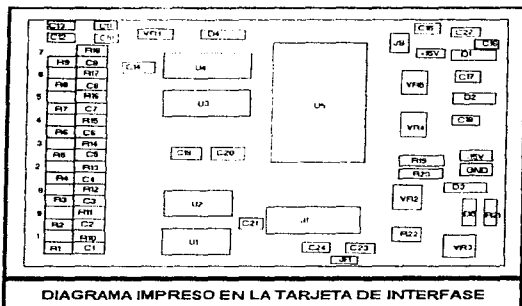


Figura 3.8

3.3.2 Cómo trabajan los relojes.

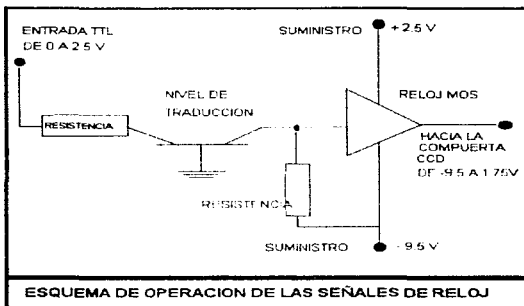


Figura 3.10

El diagrama de la figura 3.10 muestra la operación de las señales de control. Los relojes generan voltajes de entrada que el CCD requiere. Estos niveles de voltajes difieren de las compuertas de salida TTL de la tarjeta de interfase, y para complicar más las cosas, cada compuerta de entrada de reloj de nivel alto se define como un voltaje entre +1.5 volts y +2.0 volts y la entrada de reloj de nivel bajo es de -9.0 volts a -10.0 volts. Los niveles del reloj en las compuertas de entrada deben cambiar rápidamente sus estados. Las compuertas señales en el TC-245 y en las compuertas del registro de transferencia deben estar en el rango de 15 nseg. Para que el CCD trabaje óptimamente, sus niveles de reloj de las compuertas de entrada deben cambiar de -8.38V a 0.63 V en 15 nseg.

La circuitería traduce el nivel TTL a los niveles de reloj del CCD con un dispositivo cambiador de nivel y un chip manipulador de señales de reloj MOS, el DS0026. Aquí la entrada de lógica baja del DS0026 se referencia a un valor, en lugar de tierra. El punto de referencia de tierra se mueve a -9.5 V con un circuito transistor formado por los elementos Q1, R30 y R24.

3.3.3 Como trabaja el pre-amplificador.

La señal de salida del CCD se hace más negativa a medida que se incrementa la señal de la imagen, pero el ADC necesita señales de la imagen que sean más positivas para niveles de luz más altos. Adicionalmente, la señal de salida del CCD contiene un nivel DC de cerca de 9 volts. Para almacenar la imagen original del CCD, el pre-amplificador usa un seguidor de voltaje de ganancia unitaria, el transistor Q7. Para enviar la señal correcta al ADC, un amplificador

operacional U6, invierte la señal CCD y sustrae el voltaje de offset. La salida del CCD es almacenado por el seguidor de voltaje de ganancia unitaria, el transistor Q7. Este transistor tiene la función de bajar la impedancia del CCD de 700 ohms a 10 ohms.

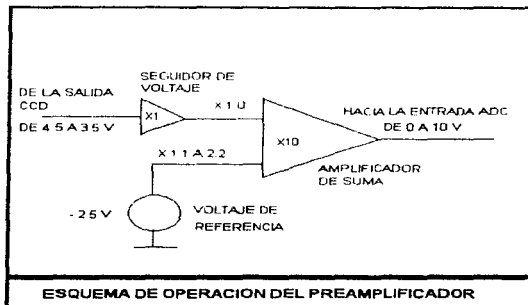


Figura 3.11

El TC-245 genera una señal de 4 microvolts por cada electrón. Para el TC-245 la máxima salida de voltaje útil es de 0.5 volts. Para producir el rango dinámico máximo se debe mantener la ganancia del amplificador tan baja como sea posible. La ganancia del amplificador U6 se dá mediante la razón $R43/R45$.

Para el TC-245 la ganancia es de -17.73, es decir, $R45 = 2.2 \text{ Kohms}$ y $R43 = 39 \text{ Kohms}$. El offset DC se sustrae de la salida del CCD al colocar un voltaje de referencia en la segunda entrada del amplificador operacional. Este voltaje viene del circuito que incluye el resistor R44 y el potenciómetro P1, conectado al voltaje de referencia de -2.5 V en el U11. Al cambiar el valor de P1 se ajusta el nivel de offset. El rango de ajuste es igual al voltaje de referencia multiplicado por la razón del resistor $R45/(p1 + R44)$, es decir, de 5.5 V a 3.5 V.

El circuito del voltaje de referencia U11 opera como un diodo de referencia tipo Zener. El resistor R47 provee 7 nA de corriente de la fuente de -9.5 V. Para reducir el ruido de frecuencia en el voltaje de referencia de -2.5 V en el U11 se acoplan capacitores de Tantalio C33 y C40.

El TC-245 requiere de un nivel de voltaje de -2.5 V aplicado a la compuerta de anti-fluorescencia.

3.3.4 Diagramas del diseño de la tarjeta pre-amplificadora.

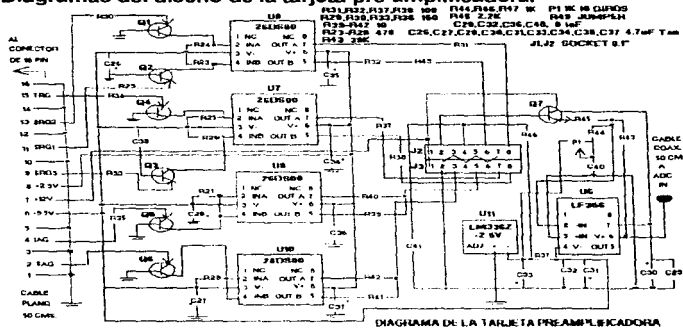


Figura 3.12

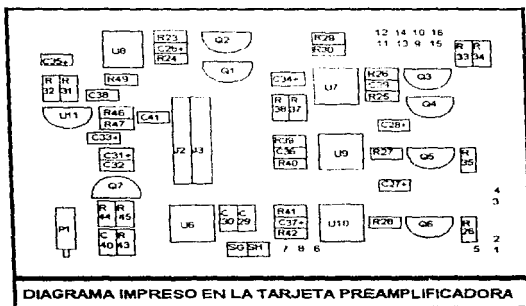


Figura 3.13

Aunque se puede operar la cámara a un nivel bajo del sistema Peltier, la cámara dará mucho mejores resultados con el líquido en circulación.

A un lado de la cabeza de la cámara se monta la tarjeta pre-amplificadora, lo más cerca posible para que los cables que llevan las señales de operación produzcan la mínima interferencia y aseguren una adecuada operación del chip.

3.4.2 Cómo trabaja el cuerpo de la cámara.

Cada componente de la cámara realiza una tarea específica. Para comprender la labor de cada componente que la integra, a continuación se detalla su operación:

Cubierta del Tubo: El extremo final del cuerpo de la cámara se cubre con una tapa que contiene el tubo del ocular y la ventana óptica. La luz del telescopio debe caer en un foco aproximadamente a 0.89 pulgadas detrás del tope de la tapa.

Tubo del Ocular: El tubo adapta la cámara a un enfocador estándar de 1.25 pulgadas.

Ventana Óptica: Esta delgada ventana de vidrio se coloca en la parte interna de la cubierta del tubo. La ventana permite la protección del chip contra el polvo.

Cuerpo de la Cámara: Es un tubo de aluminio que contiene al CCD, el sistema de enfriamiento Peltier y los soportes para el montaje del CCD. Las aberturas con que cuenta el cuerpo permiten el paso de los cables para su operación.

Conector J2/J3: Se utiliza para unir el cuerpo de la cámara con el circuito pre-amplificador.

Tarjeta Pre-amplificadora: Se monta a un lado de la cabeza de la cámara.

Los soportes para el CCD sirven tanto para sostener al CCD así como para enfriarlo. Su base se monta sobre el lado frío del módulo de enfriamiento termoelectrónico Peltier. Cuando dicho módulo Peltier se activa, la base del soporte se enfría por completo. La base del soporte se enfría antes que el chip y durante la operación, siempre se mantiene más fría que el chip. Como resultado, cualquier vapor de agua presente en el cuerpo de la cámara se condensa y se congela en la base del soporte del CCD, manteniendo así al chip siempre seco.

Módulo de enfriamiento PELTIER: Actúa como una bomba, moviendo el calor de una de sus caras a otra. Este componente electrónico se posiciona entre el soporte del CCD y el intercambiador de calor.

Intercambiador de Calor: Se utiliza para remover el calor del módulo de enfriamiento Peltier.

Plato Final: Cubre la parte baja del intercambiador de calor y mantiene la mezcla congelante.

3.4.3 Diagramas del diseño del cuerpo de la cámara.

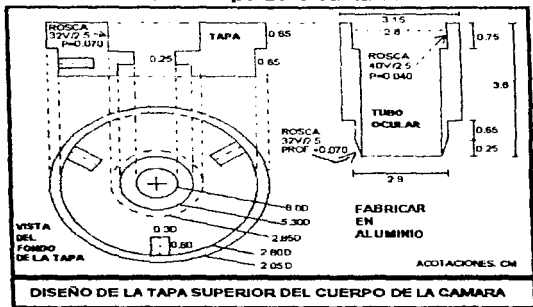


Figura 3.15

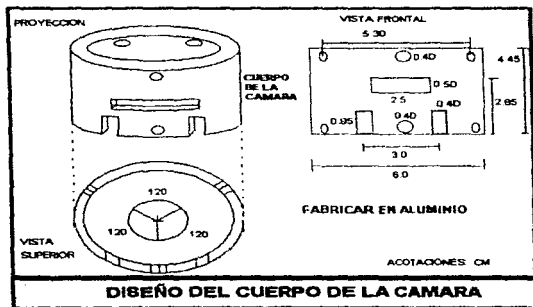


Figura 3.16

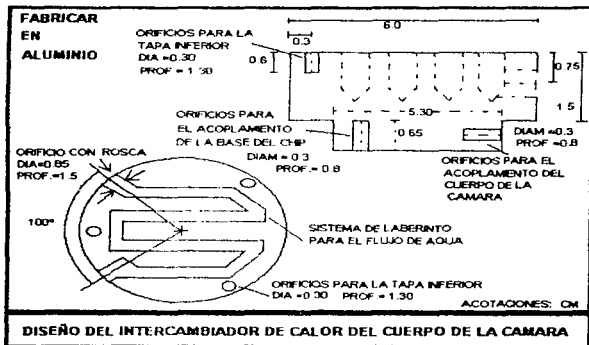


Figura 3.17

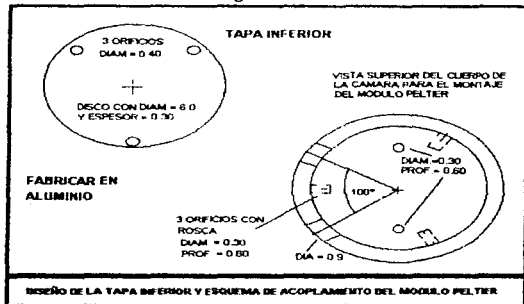


Figura 3.18

79

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

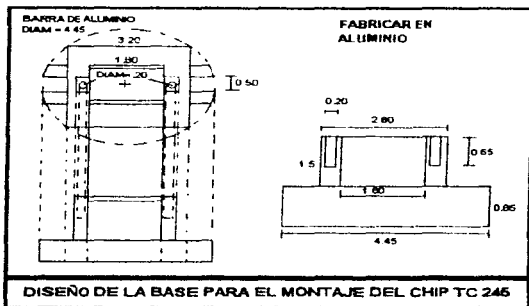


Figura 3.19

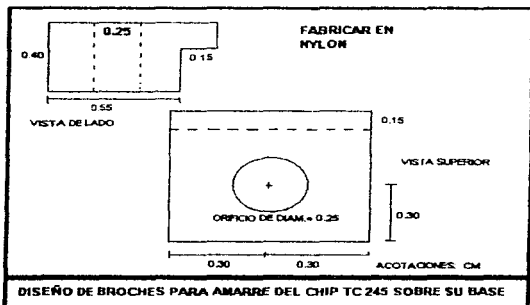


Figura 3.20

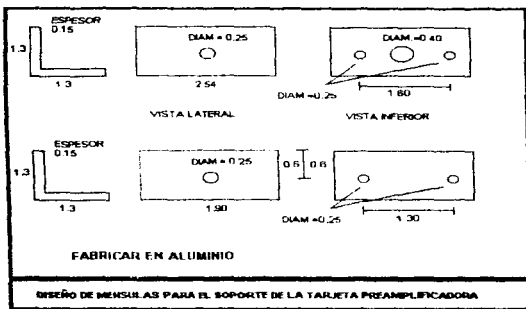


Figura 3.21

3.5 Diseño del sistema de enfriamiento.

3.5.1 Qué hace el sistema de enfriamiento.

El hecho de enfriar un chip CCD reduce el efecto de la señal inducida térmicamente o la corriente oscura. Cuando el chip CCD se cubre contra la luz, la carga se acumula en las fotoceldas y estas se llegan a saturar después de un período de tiempo. Entre más frío esté el CCD, mayor será el tiempo en que se sature con las cargas inducidas térmicamente. El número de electrones que fluyen en la corriente oscura varía aleatoriamente, de modo que aún después de haber calibrado la imagen, al sustraer el cuadro oscuro o imagen oscura, la variación aleatoria llamada ruido aún permanece. Entre mayor sea la corriente oscura, mayor será el nivel de ruido y mayor será la variación de los valores de los píxeles. Reducir la temperatura del CCD disminuye significativamente el ruido, lo que quiere decir que se pueden tomar exposiciones de mayor tiempo. Una aproximación es que la corriente oscura se decrementa por la mitad por cada 7 °C de disminución en la temperatura. La tabla de la figura 3.22 muestra el efecto del enfriamiento sobre la corriente oscura relativa a la temperatura ambiente.

EFECTO DE ENFRIAMIENTO DE UN CHIP CCD	
TEMPERATURA (°C)	CORRIENTE OBSCURA
+ 25	1.0000
+ 20	0.6000
+ 15	0.3700
+ 10	0.2300
+ 5	0.1400
0	0.0840
- 5	0.0510
- 10	0.0310
- 15	0.0200
- 20	0.0120
- 25	0.0071
- 30	0.0043
- 35	0.0026

LA CORRIENTE OBSCURA ES CON
RELACION A LA TEMPERATURA
AMBIENTE DE 25 °C

Figura 3.22

El ruido térmico es proporcional a la raíz cuadrada del nivel de la corriente oscura. El nivel de la corriente oscura depende de la temperatura y del tiempo de exposición. Exposiciones muy largas con bajo ruido y su correspondiente nivel de baja corriente oscura, pueden ser obtenidas solamente mediante el enfriamiento del chip CCD a temperaturas muy bajas.

Doblar el tiempo de exposición mejora la razón señal a ruido por la raíz cuadrada de dos o un factor de 1.4. Cuando se dobla la corriente oscura al momento de doblar el tiempo de exposición, también se incrementa el ruido.

La reducción de ruido es posible también promediando más de una imagen. El valor del ruido se reduce por la raíz cuadrada del número de imágenes promediadas. Promediar dos imágenes es equivalente a tomar una exposición de dos veces del tiempo original o a reducir la temperatura del chip CCD por 7 °C.

En la práctica, promediar múltiples imágenes es menos efectivo en la reducción del ruido que hacer exposiciones más largas, porque cada lectura contribuye a crear ruido térmico. Por consiguiente, enfriar un chip CCD es esencial para conseguir un buen rendimiento necesario para imágenes astronómicas. Sin embargo, se debe aplicar un criterio para la selección de un sistema de enfriamiento. Enfriar demasiado rápido o enfriar en demasía puede causar fallas al CCD debido a la expansión térmica diferencial de los materiales.

Existen varios métodos para el enfriamiento del chip CCD, como son: refrigeración mecánica, gas, enfriamiento con hielo seco y enfriamiento termoeléctrico.

Se seleccionó el sistema de enfriamiento termoeléctrico para la cámara mediante la implementación de un módulo Peltier, el cual resulta ser muy compacto y sobre todo muy económico.

3.5.2 Cómo trabaja el sistema de enfriamiento.

El calor es el resultado del movimiento de partículas dentro de una sustancia. En un metal, el calor es conducido por los electrones, los cuales se pueden mover libremente. Los electrones son partículas cargadas. Si se crea en un metal una distribución irregular de electrones, aparece un voltaje debido a la concentración de carga. Una manera de alterar la concentración de electrones es mediante el calor. Si una parte de un metal se calienta, los electrones en la parte caliente tienen más energía térmica y por lo tanto se mueven hacia las partes frías. El calor fluye rápidamente de las partes calientes a las partes frías del metal. Sin embargo, antes de que el metal llegue a un equilibrio, las cargas desbalanceadas producen una diferencia de voltaje entre las regiones fría y caliente. La energía de los electrones en diferentes metales tiene un valor diferente. Si dos metales diferentes se ponen en contacto, los electrones en el metal con mayor promedio de energía se mueven al metal con menor promedio de energía. Como resultado del movimiento preferencial de los electrones se crea una carga desbalanceada y aparece un voltaje entre los metales. El movimiento de los electrones continúa hasta que los dos metales llegan a un equilibrio.

Los dispositivos de enfriamiento comerciales tipo Peltier utilizan semi-conductores compuestos por Telurio de bismuto que mejora el efecto. Son semi-conductores del tipo N o P, dependiendo del fabricante. En el tipo N, los electrones transfieren la carga y el calor. En el tipo P, hacen agujeros donde se pierden los electrones. Si un lado del semi-conductor se calienta, aparece un voltaje a través del dispositivo y dicho dispositivo se activa como un termo-acoplador, generando un voltaje proporcional a la diferencia de temperatura. Con una carga y una diferencia de temperatura mantenida, fluye una corriente y el dispositivo genera potencia. Cuando se conecta una batería para proveer un voltaje externo, un lado del dispositivo se calienta y el otro se enfría. Si la polaridad de la batería se cambia, se invierte el flujo de las cargas. En el diseño de la cámara, el enfriamiento del chip CCD lo realiza un dispositivo Peltier.

3.5.3 Cómo trabaja el sistema Peltier.

El dispositivo Peltier es extremadamente efectivo para enfriar el chip CCD, debido a que es compacto y sencillo. Cuando se aplica potencia al módulo, se genera un flujo de calor. La capacidad de bombeo de calor está relacionada con la corriente aplicada al módulo. Para la cámara, se seleccionó el módulo de enfriamiento termoeléctrico Melcor CP1.4-71-06L. En este módulo Peltier, la corriente es aproximadamente, el voltaje administrado dividido por 1.65 ohms.

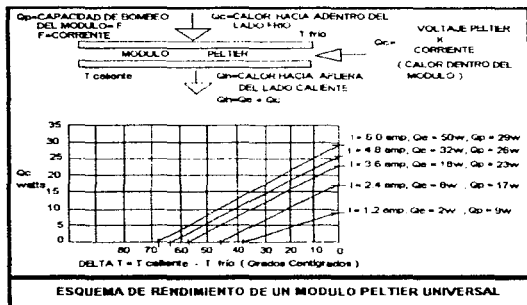


Figura 3.23

El esquema de la figura 3.23 muestra el rendimiento de un módulo Peltier universal. Para mantener la temperatura deseada en el módulo Peltier, la entrada de calor en el lado frío, debe ser menor que la capacidad de bombeo de calor del módulo. Adicionalmente, la máxima temperatura en el módulo no puede ser mayor de 67 °C, aún cuando no haya entrada de calor en el lado frío.

Si el calor no puede ser removido del lado caliente del módulo, el lado frío fallará al enfriar el chip CCD, porque la temperatura del lado frío es la temperatura del lado caliente menos la diferencia de temperatura del módulo. En otras palabras, para lograr bajas temperaturas en el lado frío del sistema Peltier, la temperatura del lado caliente debe conservarse muy baja también. Se tomó la mínima temperatura para el TC-245 tal como se especifica por Texas Instruments de -30 °C.

La corriente oscura y el ruido térmico a esta temperatura son bastante bajos para realizar un buen trabajo astronómico.

La cámara emplea un solo módulo Peltier para enfriar el chip a una temperatura de -30° C bajo condiciones favorables. Después de revisar las alternativas con aire forzado o convección de aire, se seleccionó la circulación de agua para remover la pérdida de calor del lado caliente del módulo Peltier. La capacidad del agua para absorber calor es mucho mayor que la del aire. Para incrementar la temperatura de un centímetro cúbico de agua en un grado centígrado, se requiere de un watt de potencia durante 4.2 segundos. Así, un flujo moderado de agua, puede remover el calor generado en el CCD y mantener un alto grado de estabilidad térmica. Aunque es posible usar un sistema de circulación abierto, se optó por un sistema cerrado. El agua en circulación debe contener un 30% de alcohol isopropílico para controlar algas y bacterias. El calor del módulo de enfriamiento Peltier se pasa al agua a través del uso de un cambiador de calor de

aluminio. Para hacer circular el agua es suficiente una bomba para limpia-parabrisas, operada a un voltaje bajo. El calor se remueve del agua utilizando un radiador inmerso en un recipiente. El radiador es simplemente un tubo de cobre de $\frac{1}{4}$ " enrollado. El rollo de cobre se coloca en un recipiente con agua con capacidad de 20 litros.

La cantidad de calor generado por el módulo es una parte significativa del total del calor generado. La base del chip y el mismo chip CCD contribuyen a una carga térmica de cerca de 7 watts de calor, dependiendo del punto de operación del módulo. En otras palabras, para remover solo unos cuantos watts de carga térmica del chip, se deben remover tres veces más watts del sistema de enfriamiento. El sistema propuesto es sencillo, seguro y fácil de construir.

Debido al gran poder de disipación en el módulo Peltier, es importante operar el sistema solo cuando el agua esté en circulación. Se puede probar la cámara sin circulación de agua, proporcionando al módulo Peltier un voltaje no mayor a 1.5 volts. A voltajes mayores, se podría arruinar la soldadura en el módulo Peltier.

Aún con el líquido en circulación, el módulo Peltier tiene limitaciones. El voltaje de operación nunca debe ser mayor a 8.6 volts y la corriente del módulo debe permanecer debajo de los 6 Amperes todo el tiempo. Debido a que el cuerpo de la cámara se enfría mediante un cambiador de calor, la temperatura de la cámara se regula por la temperatura del líquido en circulación. Si el agua está por debajo del punto de congelación, el polvo se puede condensar en la ventana en la parte frontal de la cámara. Se puede prevenir la condensación manteniendo la temperatura de enfriamiento siempre arriba del punto de congelación.

Para prevenir la formación de escarcha en el chip CCD se utilizó en el diseño una base para el chip suficientemente grande para congelar la mayoría del polvo del aire en el intercambiador. Debido a que el cuerpo de la cámara está sellado, una vez que el polvo se condensa en la base del chip CCD, dicho chip permanece seco. Se debe tener mucho cuidado de que el cuerpo de la cámara quede totalmente sellado.

La tabla de la figura 3.24 muestra la relación entre el voltaje y la corriente en el módulo Peltier:

VOLTAJE PELTIER CONTRA CORRIENTE	
SUMINISTRO DE VOLTAJE PELTIER (VOLTS DC)	FLUJO DE CORRIENTE EN EL MÓDULO PELTIER (AMPERES)
2.00	1.20
4.00	2.40
5.90	3.60
7.90	4.80

Figura 3.24

Por cada decremento de 1 °C en la temperatura del agua, se ganarán sólo cerca de 0.4 °C en el chip CCD. En una noche seca y muy fría se pueden alcanzar temperaturas de -45 °C.

Si se desea medir la temperatura de la base del chip directamente, se puede pegar un termistor como el Radio Shack número 271-110 con una resistencia de 10 Kohms a 25 °C a la base del chip. El fabricante proporciona con el termistor una curva de calibración.

3.5.4 Diagramas del diseño del sistema de enfriamiento.

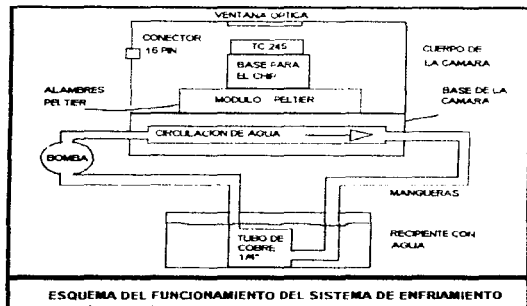


Figura 3.25

3.6 Software para operación de la cámara.

3.6.1 Qué hace el software de la cámara.

El programa para el control de la cámara está diseñado para tomar imágenes rápida y fácilmente. El programa de software controla la cámara a través del puerto paralelo de la computadora. El programa está compuesto por menús y cuenta con detalles técnicos para comunicarse con la cámara. Para encontrar un objeto celeste, la tecla F es para el modo de buscar. Una vez que se encuentra una imagen la tecla A sirve para ajustar la brillantez automáticamente. Es posible encontrar objetos con tiempos de exposición de 1 o 2 segundos. Para comenzar una "integración", es decir, capturar una imagen en el CCD, se debe presionar la tecla I y se debe especificar el tiempo de integración, que puede ser de varios minutos. Cuando la integración está completa, la tecla D la muestra en la pantalla y la tecla A ajusta su brillantez. Si se desea almacenar esa imagen, se presiona la tecla S y se le da el nombre al archivo. El programa de software permite hacer exposiciones de cuadro completo, cuadros oscuros y cuadros de medio y un cuarto de exposición. Las imágenes de cuadro completo naturalmente dan el mayor campo de visión, pero ocupan más espacio en disco. Las imágenes de un cuarto de cuadro pueden ser usadas para enfocar una imagen o para encontrar objetos muy ténues con exposiciones para pruebas de muy poco tiempo.

Aunque la brillantez se ajusta automáticamente, también puede seleccionarse manualmente. Se puede remover un cuadro oscuro de la imagen en el monitor y en tiempo real y se puede almacenar la imagen usando cualquier nombre de archivo de 8 caracteres, válido para el sistema operativo DOS. El programa añade las extensiones PIX, PI2, PI4, PA, PB, PC y FTS a los nombres de los archivos para identificar los formatos de las imágenes. El programa esencialmente toma la imagen, la despliega en pantalla y la almacena. El programa no está diseñado para realizar sustracción oscura o procesamiento de imágenes. Se pueden realizar estas operaciones con software diseñado específicamente para calibración y procesamiento de imágenes. Para calibrar y procesar imágenes para el chip TC-245 se puede usar cualquier software que pueda leer archivos tipo FIT, como el Hidden Image, Epoch 2000, Image 32, MIRA, CB245PIX, Superfix o Procesamiento de Imágenes Astronómicas para Windows.

3.6.2 Cómo trabaja el software de la cámara.

El programa opera a través de menús. Los menús permiten navegar por el programa para operar la cámara. Cada función tiene su propio menú. Desde cada menú se pueden hacer tres cosas: ejecutar un comando para realizar una tarea, moverse a un menú de un nivel más inferior o moverse a un menú de un nivel superior. Cuando se opere la cámara se tendrá mucho mayor contacto con el software que con la cámara.

Antes de operar la cámara con el software se debe crear un archivo de configuración para determinar el tiempo óptimo de respuesta para la computadora y la cámara. Una vez creado este archivo no será necesario crearlo otra vez.

3.6.3 Funciones generales del software AP-245.

El archivo de configuración se almacena en el archivo SETAP2.DAT. Este archivo contiene 96 bytes aunque su contenido puede variar. Contiene la dirección del puerto paralelo, los tiempos de respuesta de la computadora y los datos de configuración del puerto serial para poder manejar dispositivos adicionales.

Log data

El archivo "log data" se almacena como LOG.DAT. Cada entrada añade aproximadamente 96 bytes al tamaño del archivo. Este archivo contiene los nombres de los archivos de imágenes, la estampa de la fecha y la hora de la exposición, la longitud de la exposición y un comentario opcional. El archivo log.dat se actualiza automáticamente después de que cada archivo de imágenes se almacena.

Funciones del AP245

Con el programa AP245 se pueden seleccionar una variedad de funciones. Por lo que el CCD siempre está listo para iniciar una integración en el instante que la tecla apropiada se active. Para realizar imágenes, se debe proceder a conectar la cámara a la computadora, prender el sistema Peltier para comenzar a enfriar al CCD, prender la fuente de alimentación y correr el programa de software.

MENU PRINCIPAL del software AP245:

245 MAIN MENU

RESET: 4095

REF: 4095

I: Integrate Image
M: Multiple Images
D: Display Image
F: Focus
C: Copy as Dark Frame
A: Autoguide
O: Options
P: Set New File Path
S: Store Image
G: Get Image
X: Export to FITS
Q: Quit

01:25:39

Ref.

Es el contador analógico/digital para la salida del CCD. Se debe ajustar el valor de Ref mediante el potenciómetro P1 a un valor cercano a los 75 ohms cuando la cámara se enfría a la temperatura de operación normal.

Reset.

Es el nivel de voltaje de referencia del CCD. Para el TC-245 el nivel de reset es de cerca de 800 veces amba del nivel de Ref. Cuando el valor de Ref se pone en 75, el valor Reset será de 875.

Ambos valores Ref y Reset dependen de la temperatura del CCD y de cuanta luz incide sobre el chip. Cuando se activa el sistema Peltier el valor de Ref y Reset se incrementan. Cuando se expone el chip a mucha luz, ambos valores también se incrementan. Con el potenciómetro P1 se pueden variar los valores de Ref y Reset a 0 o a 4095. Lo importante es que el valor de Ref debe ser entre 50 y 100 con el sistema Peltier en operación y el chip CCD en completa oscuridad.

Comando Integrate Image

Sirve para tomar imágenes con una integración de 1 segundo hasta 16 minutos.

Comando Multiple Images

Sirve para tomar imágenes desde 1 hasta 991 en un intervalo específico, usando un cierto tiempo de integración. El programa toma automáticamente la imagen y la almacena con el nombre de archivo definido previamente.

Comando Display Image

Es utilizado para mostrar las imágenes captadas. AP245 muestra la imagen a una escala de 3/4 en el modo 252 X 242 y a una escala de 1/2 imagen en el modo de 378 X 242 pixeles.

Comando Focus/Find

Se utiliza para localizar un objeto estelar en el campo de la cámara o para enfocar la cámara con la imagen de algún objeto.

Comando Copy as Dark Frame

Cuando se hacen exposiciones largas de objetos muy débiles, el ruido en el cuadro oscuro puede saturar la imagen. Para mejorar la imagen se debe tomar un cuadro oscuro y restarlo de

la imagen original. Para hacer un cuadro oscuro, se tapa el telescopio y se hace una integración del mismo tiempo en que se toman las imágenes. Se debe almacenar el cuadro oscuro, ya que se requiere para calibrar las imágenes más tarde. El cuadro oscuro se puede sustraer de cada imagen original mediante la tecla D en la función de Display.

Comando Autoguide

Permite usar el puerto serial de la computadora para guiar el telescopio automáticamente. Aunque la cámara está diseñada primordialmente para tomar imágenes, puede realizar un excelente trabajo como autoguiador. El apéndice C3 muestra los detalles técnicos para llevar a cabo un autoguiador.

Comando Options

Este comando es un conjunto de funciones que permiten modificar la forma en que opera la cámara y el software.

Comando Set-File-Path

Permite el almacenaje de los archivos en cualquier directorio previamente especificado. Por ejemplo, para almacenar archivos múltiples con los nombres MAR001.PIX, MAR002.PIX, MAR003.PIX, etc. en el directorio 10DIC96 en el disco C. Se introduce C:/10DIC96/MAR. Cuando se realizan múltiples imágenes, el número y la extensión apropiada se añaden automáticamente.

Comando Store-Image

Almacena las imágenes con el tipo de extensión requerida. El programa determina el formato de la imagen en memoria y le añade la extensión apropiada.

Comando Store-Image

Comando Get-Image

Para cargar una imagen en memoria desde el disco.

Comando Export to FITS

Si se desea exportar la imagen a cualquier otro software se requiere usar este comando. Los archivos FITS (Flexible Image Transport System) son los más usados por los astrónomos profesionales para el almacenaje de sus imágenes. El programa almacena la imagen con un encabezado de 2880 bytes que proporciona a otros programas la información requerida para cargar la imagen. AP245 almacena la imagen como un entero de 16 bits por pixel. Una vez que se ha almacenado la imagen como FITS, no se podrá volver a cargar en el programa AP245. No es necesario escribir la extensión FTS debido a que el programa la asigna automáticamente.

Comando Quit

Sirve para terminar la ejecución del programa AP245.

CAPITULO 4.

Construcción de la cámara digital.

4.1 Construcción de la fuente de alimentación.

4.1.1 Construcción del casco.

La fuente de alimentación se construyó en tres etapas: en la primera se elaboró el casco, en la segunda se instalaron los componentes AC y en la tercera se instalaron y se alambraron los componentes DC.

El casco de la fuente de alimentación consiste de una base de madera de 1/2" de espesor y de cuatro lados y una tapa superior de 1/4".

En la parte posterior se instaló el panel de AC, que cuenta con 2 switches de 120 volts que suministran la entrada para todos los componentes de la fuente. También cuenta con dos alimentaciones de 120 volts AC.

Al frente se instaló el panel DC con jacks para plugs tipo banana que proporcionan la potencia DC necesaria para la operación de la cámara. Del lado derecho se instaló el extractor de aire y del lado izquierdo está el panel de ventilación.

Panel de AC: Este panel lleva dos switches y dos entradas de AC de 120 volts y está en la parte posterior de la fuente.

Panel de Ventilación: Contiene orificios para permitir la entrada de aire fresco, para que el extractor lo haga fluir hacia afuera y así poder mantener las condiciones de operación adecuadas.

Panel de DC: En este panel se montaron todos los jacks para conector tipo banana necesarios para el suministro de voltajes para la cámara, que son:

+15 VDC	Sistema Peltier	Potenciómetro
-15VDC	Bomba	Vóltmetro
Común	Común	

Panel de Extracción: Sobre este panel se montó un extractor de 3" de diámetro para expulsar el aire caliente generado por los componentes eléctricos.

4.1.2 Ubicación de los componentes.

En primera instancia, se instalaron los plugs, jacks, fusibles, potenciómetro y voltmetro y se marcaron por la parte interna del casco todas las salidas y entradas correspondientes. Posteriormente, de acuerdo a los diagramas de diseño propuestos se instalaron los transformadores, capacitores, resistencias, rectificadores de puente, disipadores de calor, reguladores de voltaje y diodos.

4.1.3 Alambrado de componentes AC.

Reglas de cableado AC.

Los componentes empleados en la fuente de alimentación convierten una señal de corriente alterna de 120 volts en una señal de corriente directa de relativamente bajo voltaje, que requiere la cámara digital.

A causa de que la toma de corriente es potencialmente letal, deberá tenerse mucho cuidado en el alambrado y la prueba de la fuente. Para máxima seguridad, se aislaron los cables expuestos en la parte de las uniones.

La línea de tierra

La línea de tierra tiene como finalidad derivar voltajes peligrosos hacia tierra. Se utilizaron cables color verde para conexiones a tierra. Es necesario utilizar la fuente sólo en tomas de corriente que cuenten con una instalación de tierra física.

La línea neutral.

La línea neutral tiene como objeto regresar la corriente alterna utilizada. Aunque los alambres de línea neutral generalmente no tienen potencial, la línea neutral no debe ser aterrizada. Corrientes altas pueden causar que un voltaje aparezca en el neutral. Se utilizaron cables color negro para el neutral.

La línea de corriente.

La línea de potencia tiene un potencial de 120 volts AC. Este voltaje se encuentra presente en la fuente de alimentación. El alambrado correcto es muy importante para asegurar que una potencia no aparezca letal en ninguna de las terminales de potencia de bajo voltaje DC. Se utilizaron cables blancos para la línea de corriente.

4.1.4 Alambrado de componentes DC.

Se utilizó alambre calibre 18 multifilar y se alambrió en dos etapas. En la primera se alambrieron las salidas + 15 VDC y - 15 VDC, la salida DC para la bomba y la porción no regulada de la circuitería Peltier.

En la segunda etapa se alambrió la porción regulada del sistema Peltier.

Finalmente, se realizaron todas las uniones y se soldaron de acuerdo a los diagramas propuestos.

4.1.5 Pruebas de operación.

Para que la cámara trabaje adecuadamente, la fuente debe proporcionar los siguientes voltajes de salida:

Para el TC 245 se requiere:

De -15 VDC a +18 VDC a 250 mAmp.

De -15 VDC a -18 VDC a 250 mAmp. y el voltaje AC deberá ser de

VAC < 300 mVpp máx.

Para la Bomba se requiere:

5 VDC mínimo a 1 Amp. y,

VAC < 2 Vmáx.

Para el Sistema Termoeléctrico Peltier se requiere:

Mínimo: 5 VDC a 3 Amp

Ideal: De 0.5 VDC a 7.2 VDC a 5 Amp. mínimo y,

VAC < 50 mVpp máx.

Se conectó la fuente a la toma de corriente y se activaron los dos switches. Después de unos minutos se detectó que no hubo componentes mal instalados. Un capacitor electrolítico mal instalado, por ejemplo, hubiera explotado casi instantáneamente.

La primera indicación positiva de que la fuente está trabajando adecuadamente es el hecho de que el LED se prende al momento de cerrar el switch.

Una vez instalados los reguladores de voltaje y los diodos se conectó la fuente de alimentación para asegurar que los voltajes no regulados provenientes de la fuente de alimentación estuvieran llegando adecuadamente a la tarjeta y ésta, los convirtiera adecuadamente.

Tercera etapa: Prueba de los niveles lógicos entre la tarjeta de interfase y la computadora.

En esta etapa se realiza una prueba real de interfase y es cuando la computadora comienza a entenderse con la tarjeta de interfase.

Se dividió en tres pruebas. En la primera prueba se checó la continuidad de cada pin con el conector DB-25 del cable de interfase. En la segunda prueba se conectó la computadora a la tarjeta y se verificó que los voltajes de los niveles lógicos fueran los correctos. Esta prueba determina si el alambrado del cable de la computadora y los niveles de manejo de la lógica son correctos. En la tercera prueba se verificó que la entrada de datos del puerto de impresión proporcionara los voltajes correctos.

Cuarta etapa: Instalación y prueba de convertidores y multiplexores.

Se instalaron los convertidores y los multiplexores en sus sockets y se realizaron dos pruebas.

En la primera se verificó que el conector DB-25 presentara los voltajes adecuados, lo que previene que se pueda ocasionar algún daño a la computadora. En la segunda prueba se determinó la salida de los niveles lógicos de los convertidores 74LS14 y se realizó una prueba de la conexión entre conector J1 y la entrada del convertidor analógico/digital.

Quinta etapa. Prueba del convertidor.

Se instaló el convertidor analógico/digital en su socket y se construyó un circuito divisor de voltaje para poder producir un voltaje de entrada variable y así poder probar dicho convertidor ADC.

Habiendo pasado esta última prueba, la tarjeta de interfase quedó lista para su conexión con la tarjeta pre-amplificadora y la computadora.

4.2.2 Cable de interfase.

Se conectó el cable de interfase de 4.5 metros de 25 hilos de la siguiente manera. A un extremo se le instaló un conector de presión DB-25 hembra y al otro extremo se instaló un conector de presión macho DB-25. La conectación se realizó uno a uno, es decir el pin uno del conector hembra corresponde al pin 1 del conector macho.

Posteriormente, con el multímetro digital se procedió a realizar una prueba de conductividad, uno a uno, que resultó correcta.

4.2.3 Cable de alimentación.

Se elaboró un cable de alimentación $\pm 15V_{DC}$ de tres conductores de 4.5 metros de longitud de la siguiente manera.

Primero, se realizaron tres puentes en el conector DB-9 hembra de la siguiente manera: pin 1 con el pin 2, pin 4 con el pin 5 y, pin 6 con el 7, 8, y 9.

Posteriormente se soldó un extremo del cable de 4.5 metros de la siguiente manera: el alambre rojo ($+15V_{DC}$) se conectó a los pines 4 y 5, el alambre negro ($-15V_{DC}$) a los pines 1 y 2, el alambre verde (común $\pm 15V_{DC}$) a los pines 6, 7, 8 y 9. Al otro extremo, en cada uno de los alambres se soldaron conectores tipo banana.

Posteriormente, con el multímetro se procedió a realizar una prueba de conductividad uno a uno, que resultó correcta.

4.2.4 Instalación de la tarjeta en su caja.

Primero se montó la tarjeta en su caja y se marcó el lugar exacto donde quedaría ubicado el regulador 7805. Posteriormente se hizo el orificio correspondiente para dicho regulador y finalmente se procedió a la instalación definitiva de la tarjeta de interfase en su caja. Se atornilló el regulador 7805 al chasis de la caja de interfase y se verificó que el regulador LM337 no hiciera ningún tipo de contacto con el chasis, debido a que es un regulador negativo y podría hacer corto si hay algún contacto.

4.3 Construcción de la tarjeta pre-amplificadora.

4.3.1 Ensamble de cables y conectores.

Construcción del plug J2/13.

Para elaborar este plug se utilizaron dos sockets de corte de 8 pines.

Estos se pegaron uno al otro tratando de conservar un espaciamiento entre los centros de los pines de 0.1". Posteriormente se cortaron 16 tramos de alambre calibre 26 con una longitud de 3/4" cada uno. Estos 16 alambres se colocaron en los 16 pines del socket y se soldaron cuidadosamente para que no se tocara ningún alambre con el otro.

Finalmente se soldó este plug a la tarjeta pre-amplificadora en la forma contraria a como se instalaron los demás componentes. Este socket será el punto de conexión con el cuerpo de la cámara.

Construcción del cable J1.

De un tramo de cable plano de 50 cms de longitud se elaboraron dos cables de 8 hilos cada uno. Los dos cables de 8 hilos se soldaron al socket de 16 posiciones evitando cualquier contacto entre ellos. Un cable se soldó a los pines del 1 al 8 y, el otro cable a los pines del 9 al 16.

Construcción del cable coaxial JS.

Se elaboró un cable coaxial de calibre 20 de 50 cm de la siguiente manera. Se pelaron ambos extremos del cable aproximadamente 1.5 cms y se desnudó el alambre multifilar interior y se soldó a uno de los pines de un socket de dos posiciones. Asimismo, el alambre multifilar de la malla de protección se unió y se soldó al otro pin del socket de dos posiciones, cuidando de que ninguno de estos dos elementos se tocaran entre sí.

Al otro extremo del cable se le hizo el mismo tratamiento y se probó el cable con el multímetro para cerciorarse de que ningún conector hiciera contacto.

Construcción de un circuito de prueba del amplificador.

Este circuito de prueba es un simple divisor de voltaje compuesto por tres componentes: un socket de 3 posiciones, una resistencia de 10 Kohms y un potenciómetro de 1 Kohm.

Se soldaron tres alambres de 20 cms de longitud a cada una de las terminales del potenciómetro y se remataron en el otro extremo en el socket de tres posiciones. Se instaló la resistencia de 10 Kohms a la parte central del potenciómetro.

Este dispositivo, se utilizó posteriormente para la prueba del amplificador.

4.3.2 Ensamble y pruebas de la tarjeta pre-amplificadora.

Primeramente se construyó el socket J2/J3 que permitirá a la tarjeta pre-amplificadora unirse al cuerpo de la cámara. Posteriormente se ensamblaron las resistencias, los capacitores y los sockets, y finalmente se instalaron los circuitos integrados.

Para asegurarse de que la tarjeta pre-amplificadora operara adecuadamente se realizaron las siguientes cuatro pruebas:

Prueba número 1: Prueba de las resistencias de la tarjeta pre-amplificadora.

Esta prueba verifica que los sockets, resistencias y capacitores están instalados correctamente. Se realizan pruebas de continuidad con respecto a tierra y con respecto a las conexiones de -9.5 V , $+12\text{ V}$ y $+2.3\text{ V}$.

Otra prueba verifica que los circuitos que deberían estar abiertos con respecto a tierra así lo estén. Se revisa también el valor correcto de las resistencias.

Prueba número 2: Prueba de la entrada de niveles lógicos y voltaje.

Esta prueba consiste en dos etapas. La primera etapa chequea la continuidad del socket J1 con la tarjeta pre-amplificadora. En la segunda etapa se conecta la tarjeta pre-amplificadora a la tarjeta de interfase y ésta al puerto paralelo de la computadora. Así se revisa que los voltajes de suministro estén correctos. También se revisa que los valores de entrada de la lógica no arrojen cargas anormales.

Prueba número 3: Prueba funcional de los Relojes.

Una vez instalados los componentes DS0026 se revisa que estos componentes produzcan en la tarjeta pre-amplificadora las salidas de nivel bajo y nivel alto adecuadas.

Prueba número 4: Prueba funcional del amplificador operacional.

Esta prueba es para ver si la entrada del transistor Q7 está correctamente conectada y trabaja adecuadamente. Para esta prueba se utiliza el circuito divisor de voltaje previamente construido para administrar un voltaje variable al transistor. Se revisa también que el cable coaxial JS esté trabajando adecuadamente.

Después de haber terminado esta última prueba que resultó exitosa, se puede decir que no existe ninguna razón que impida que la cámara trabaje adecuadamente.

4.3.3 Fabricación de la cubierta pre-amplificadora.

Esta cubierta se fabricó de una hoja de aluminio que se tenía en casa, al igual que la cubierta de la tarjeta de interfase, siguiendo los detalles del diseño.

4.4 Construcción del cuerpo de la cámara.

4.4.1 Fabricación y ensamble del cuerpo de la cámara.

La fabricación del cuerpo de la cámara se realizó en un taller de tomeado.

Una vez obtenidos todos sus componentes se procedió con el ensamble del cuerpo.

Primeramente se construyó un socket de 16 pines mismo que se unió al cuerpo de la cámara con pasta epóxica.

Posteriormente se soldaron a este socket por la parte interna del cuerpo de la cámara 16 alambres calibre 26.

4.4.2 Instalación de los componentes.

Se pegó la ventana óptica con pasta epóxica.

Se instalaron los conectores NPT de 1/8" al intercambiador de calor. Se utilizó cinta de teflón y se cerró la base del intercambiador con silicon.

Se instaló el módulo Peltier y se sellaron las salidas de los alambres con pasta epóxica.

Se instaló la base para el CCD.

Se soldaron los 16 alambres del cuerpo de la cámara.

Se instaló el CCD en su base.

Se cerró todo el cuerpo de la cámara y se selló.

4.4.3 Ensamble final.

Se montó la tarjeta de interfase al cuerpo de la cámara mediante los sockets de 16 pines.

Se instaló la cubierta de la tarjeta pre-amplificadora.

Se amarraron todos los cables y mangueras con cintillos plásticos.

Se elaboró una limpieza general de todo el cuerpo de la cámara.

4.5 Construcción del sistema de enfriamiento.

4.5.1 Ensamble del sistema de enfriamiento.

Primeramente se doblaron los 6 metros de tubo de cobre de 1/4" sobre un cilindro de madera montado sobre un tornillo de banco y se dejó un tramo de aproximadamente 10 cm en cada extremo del tubo donde se colocaron dos tornillos de compresión de 1/4" con salida para conectores hembra tipo NPT de 1/8" y, sobre estos últimos se instalaron tornillos macho tipo NPT de 1/8".

Como sistema intercambiador de calor se utilizó una cubeta con capacidad de 20 litros a la cual se le fabricó una tapa circular de madera, sobre la cual se montó la bomba y un par de abrazaderas.

Con 30 cm de tubo PVC de 4" de diámetro se realizó una base removible sobre la cual se instaló el tubo de cobre enrollado. Este sistema removible permite realizar una limpieza de la cubeta muy fácilmente.

4.5.2 Pruebas del sistema de enfriamiento.

Finalmente, se conectó la manguera a la bomba y al cuerpo de la cámara y se vertió dentro del sistema una mezcla de agua dionizada con alcohol isopropanilico al 30% y posteriormente se purgó el sistema para eliminar las burbujas de aire.

El sistema se dejó operando por varios minutos, para asegurar su confiabilidad antes de realizar las pruebas finales a todo el sistema.

CAPITULO 5.
Integración y pruebas.

5.1 Operación inicial de la cámara.

5.1.1 Calibración y chequeo final.

Una vez contruidos y ensamblados todos los subsistemas de la cámara y haber corrido pruebas funcionales, de tal forma que la cámara responda adecuadamente a la luz, es necesario realizar una serie de ajustes para poner a la cámara en óptimas condiciones de operación.

La preparación de la cámara consiste en los siguientes cinco pasos:

1.- Establecer el valor de Ref

Con la cámara cubierta y todo el sistema en operación se debe ajustar el valor de Ref mediante el potenciómetro P1, situado en la tarjeta pre-amplificadora hasta que su valor sea aproximadamente de 75. El valor de 75 debe ajustarse después de que la cámara se haya enfriado por completo y el chip no deba recibir ninguna luz.

2.- Establecer el valor de "Delay Timing".

Debido a que la mayoría de las computadoras son más rápidas que la operación del chip, el programa AP245 requiere que se le proporcionen dos valores críticos de "delays" o retardadores de tiempo. Un delay permite al amplificador CCD un tiempo de cerca de 5 microsegundos para establecerse. El otro delay permite al convertidor analógico/digital cerca de 10 microsegundos para digitalizar la señal del CCD. Se deben ajustar estos parámetros de tiempo usando el programa AP245 y guardando los datos en el archivo SETAP.DAT.

Para establecer estos delays, se deben hacer una serie de imágenes de prueba, evaluarlas y establecer los valores de delays por prueba y error. Los parámetros de "Delay Timing" son diferentes para cada computadora.

Para tomar una imagen de prueba, dentro del comando Focus/Find del programa AP245 se selecciona el modo Focus, lo que proporciona imágenes de un cuarto de cuadro para enfoques críticos. Del submenú SETUP se selecciona el tiempo de integración de 0.5 segundos introduciendo la secuencia de datos 0005T. Se pone el nivel de despliegue negro a un nivel bajo presionando 0000L. Se pone el valor de despliegue blanco en un nivel alto de 4095 introduciendo 4095H. Se tapa la cámara de modo que no reciba nada de luz y se observa el monitor con imágenes de un cuarto de cuadro. Se presiona la tecla A para la activación de la función "auto-stretch" del monitor. Debido a que no se ha activado el sistema de enfriamiento se deberá observar una imagen ruidosa, pero con brillantez uniforme de arriba a abajo de la pantalla. Si se ve un gradiente de brillantez, es normal. Sin embargo, si se ven franjas blancas y oscuras es porque el "delay timing" del ADC es demasiado corto.

Posteriormente, cuando se activa el enfriador, la imagen será uniforme desde arriba hasta abajo. Las franjas horizontales blancas y negras aún indican que el valor ADC del delay es demasiado bajo, por lo que se debe incrementar este tiempo. Para incrementar este tiempo se debe salir al menú principal y entrar al menú DELAY dentro del menú de OPTIONS. El valor de default para el delay loop es de 10 para el amplificador y de 10 para el ADC. Se pone un valor de 30 para el amplificador y para el ADC con la siguiente secuencia de caracteres 30A0.

Se regresa al menú Focus/Find y se observan las imágenes otra vez. A menos que la computadora sea muy rápida, el delay deberá ser muy grande. Si se ven franjas, se regresa al menú OPTIONS y se ponen los DELAYS aún más largos. Si las franjas ya no se ven, se deben decrementar los valores de delays hasta que se vean otra vez dichas franjas. Una vez que se ha determinado el delay más corto que dá franjas en la imagen, se deben incrementar un 25% y se

deben usar esos valores como adecuados. Una vez eliminadas las franjas, se almacenan los parámetros con la tecla U en el menú de OPTIONS.

Si se opera la cámara desde diferentes computadoras, se debe crear un archivo SETAP DAT para cada computadora. Se pueden cambiar los parámetros en cualquier tiempo, así como crear un nuevo archivo en cualquier momento.

3.- Checar el sistema Peltier

Cuando se opera el sistema Peltier, la señal térmica del CCD caerá por un factor de 100. Para probar la operación del sistema de enfriamiento, se deben tomar una serie de cuadros térmicos y medir el nivel de la señal térmica. Para medir el nivel de la señal térmica, se debe separar la señal térmica del punto de offset del amplificador y la electrónica. En cada momento se deben tomar dos imágenes: un cuadro oscuro con una exposición suficientemente larga para que muestre la señal térmica y un cuadro bias, una exposición muy corta que muestre solo el punto de offset. Para medir el efecto del enfriamiento, se debe sustraer el cuadro bias del cuadro oscuro. La imagen resultante debe contener el valor de la señal térmica únicamente. Finalmente se necesita calcular la tasa en la cual la señal térmica crece al dividir el valor del pixel promedio del cuadro térmico por la longitud de la exposición. A una temperatura de 20 °C se debe medir una señal térmica cercana a los 1,600 en una exposición de 8 segundos para una tasa de incremento de 200 pixeles por segundo. Con el sistema Peltier en operación, la señal térmica caerá bajo los 2 pixeles por segundo. Es recomendable hacer una integración de 8 segundos con la cámara cubierta y el sistema Peltier apagado y hacer una integración de 0.1 segundos y almacenarla como un cuadro oscuro y un cuadro bias a temperatura ambiente y denominarlos como OBSTA y BIASTA. Después se entra al menú Focus/Find al modo Z-focus para observar el nivel de corriente oscura. Se activa el sistema Peltier poniendo un voltaje de 2 V_{cc} y se observa el decremento en el nivel del cuadro oscuro y del ruido. En unos 30 segundos de deberá observar un marcado decremento en el ruido.

Cuando el nivel de la señal se estabiliza, tomamos una imagen de 8 segundos y una de 0.1 segundo y las nombramos OBS2V y BIAS2V.

Repetimos el proceso para voltajes de 3, 4, 5, 6 y el voltaje completo aplicado al sistema Peltier. A medida que la temperatura cae, se necesitan hacer exposiciones más largas. A 6 volts, por ejemplo, se deberá tomar un cuadro oscuro de 4 minutos aproximadamente.

Se cargan los cuadros oscuros y de bias, y se sustrae el bias del cuadro oscuro. La imagen resultante será la señal térmica pura. Se mide el valor del pixel promedio del cuadro y entonces se divide por la longitud de la exposición para obtener la tasa de la señal térmica. Si el sistema Peltier trabaja adecuadamente se observará un decremento dramático en la señal térmica. A temperatura ambiente la señal térmica crece 200 pixeles por segundo aproximadamente, con sólo 2 volts aplicados al sistema Peltier. Con 6 volts, la señal caerá a menos de 2 pixeles por segundo. Esto significa que la cámara puede hacer exposiciones de hasta 10 minutos.

4.- Checar el ruido de radio frecuencia.

Cargar los cuadros bias y estirarlos de modo que el rango de valores de pixeles abarque el rango de blanco a negro. Idealmente, se deberá ver un ruido aleatorio disperso.

Las franjas en la imagen bias pueden ser el resultado de ruido debido a radio frecuencia. La misma computadora es el mejor candidato para la interferencia por radio frecuencia. Si el problema de radio frecuencia existe, se puede reducir o eliminar instalando dos capacitores de filtro en la caja de interfase. Se pueden soldar en cada lado de la fuente de $\pm 15 V_{cc}$ un capacitor electrolítico de 1000 microF a 35 volts. Si el problema aún persiste, se puede seleccionar el modo de doble muestreo. Si el ruido es de baja interferencia, el muestreo doble lo puede remover o reducir significativamente.

5.- Hacer una prueba de "quemado" a la cámara.

En electrónica, las fallas en los componentes ocurren dentro de las primeras horas de operación. Este efecto se denomina "mortalidad infantil". Aunque es preferible que nada falle, es más probable encontrar problemas en las etapas de prueba que posteriormente cuando ya se opera la cámara en su totalidad.

Para realizar una prueba de "quemado", se debe prender la cámara y el sistema completo por al menos 4 horas y se debe monitorear lo siguiente cada 30 minutos:

Nivel Ref. y de Reset.

Operación de la bomba.

Operación del voltaje Peltier.

Escarcha en la base del CCD.

Mantener el CCD en obscuridad total, excepto cuando se cheque la escaracha.

El resultado es satisfactorio si el Ref y Reset se mantienen estables o varían muy poco. Y no deberá haber escaracha sobre la base del CCD. El voltaje Peltier deberá permanecer constante y la bomba debe correr estable a través de la prueba. Después de que el sistema se ha estabilizado, si el nivel de Ref cambia más de 25 puntos en un período de 30 minutos se debe proceder a revisar el sistema. Un cambio en el nivel Ref significa que la temperatura del CCD está cambiando. Si el voltaje Peltier cambia más de 0,05 volts se debe checar la fuente de alimentación. La formación de escaracha es un problema mayor debido probablemente a que exista un escape de aire en el cuerpo de la cámara. Se debe inspeccionar minuciosamente para asegurar un cierre hermético perfecto. Finalmente, la bomba tiende a incrementar y decrementar su velocidad con el tiempo, pero esto es normal. En realidad, la bomba operará mejor después de un cierto tiempo de operación.

Una vez aprobados estos cinco pasos, la cámara se encuentra en condiciones de operación.

5.1.2 Primeras imágenes digitales.



Primera imagen digital obtenida con la cámara acoplando un lente de 50 mm con una razón focal $F/4$ y un tiempo de exposición de un segundo. La iluminación es debida a la pantalla de la computadora.



Imagen digital obtenida con el mismo lente utilizado en la fotografía anterior. Tiempo de exposición de un segundo.

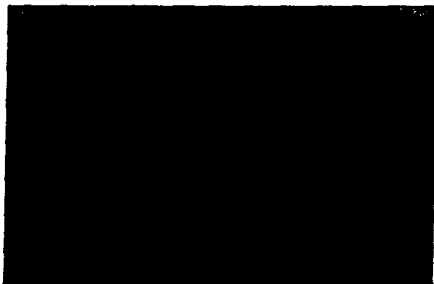


Imagen de un cuadro oscuro, es decir, imagen realizada cubriendo al CCD de cualquier luz. Tiempo de exposición de un segundo.



Imagen de un cuadro plano haciendo uso del mismo equipo. Tiempo de exposición de 0.1 segundos. Debido a la resolución de la impresora no se aprecia claramente la diferencia entre estas dos imágenes, sin embargo, cada una contiene diferente información.

CAPITULO 6.
Astrofotografia.

6.1 Obtención de imágenes astronómicas.

6.1.1 Preparación del equipo.

Para tomar buenas imágenes digitales del cielo profundo basta un lente de una cámara convencional o un telescopio pequeño y seguir una serie de recomendaciones, que son útiles para eliminar posibles complicaciones que se encuentran normalmente en los trabajos fotográficos.

Aquí están algunas recomendaciones:

Preparación del equipo.

Colocar el equipo (telescopio, cámara y computadora) en un lugar seguro y confiable es el primer paso a seguir y puede ser el patio trasero de la casa, la azotea o bien un observatorio. Si la implementación se realiza afuera de casa, se recomienda el uso de una computadora portátil para no conectar y desconectar cables o utilizar un cable plano de hasta 10 metros de longitud (que en la práctica es correcto) y realizar la instalación de todo el equipo dentro de la casa dejando sólo el telescopio o el lente fuera de ésta.

Si se cuenta con un lugar fijo como un observatorio, las tareas serán mucho más sencillas de realizar, debido a que una vez instalado el equipo, se está listo para trabajar noches continuas con el menor esfuerzo.

El lugar donde se instala el equipo deberá contar con un sistema de tierra, correctamente aterrizado.

Colocación del sistema de enfriamiento.

Adicionalmente a la electrónica, se necesita un lugar para el sistema de enfriamiento. Es necesario poner este sistema con agua en un lugar seguro lejos de un posible accidente. Verter agua en el lugar de observación puede tener un cierto nivel de riesgo. Se puede colocar dentro o fuera del lugar de observación, pero se debe monitorear que la bomba funcione adecuadamente en todo momento.

Afinar el telescopio o el lente de observación.

Establecer un buen alineamiento polar del telescopio, así como la alineación de éste con el telescopio guía, es muy importante.

Colocación de la cámara.

La cámara se conecta al telescopio de la misma manera en que se instala un lente ocular. Debido a que la cámara digital pesa aproximadamente lo que pesa una cámara fotográfica convencional, el peso de esta no es un problema para el telescopio. Lo importante es colocar la caja de interfase sobre el mismo cuerpo del telescopio.

Se recomienda el uso de una mesa para colocar los accesorios del telescopio, la computadora y la fuente de alimentación. Asimismo, se recomienda que los cables y las mangueras se aseguren de forma tal que no propicien algún accidente.

Tomar tiempo para un chequeo de seguridad.

Cuando todo parece listo para empezar, es conveniente realizar una última revisión de todo el equipo. Se debe revisar que entre las partes metálicas del telescopio, la computadora y la cámara no exista ningún voltaje AC.

Encendido del sistema.

Prender la computadora y cargar el software de operación AP245. Prender la fuente de alimentación y revisar los valores de Ref y Reset; estos deben contener los valores establecidos con anterioridad.

Verificar que el sistema Peltier se encuentra operando a su mínimo de capacidad. Esto deberá ocurrir siempre, ya que antes de apagar el sistema se debe disminuir el voltaje Peltier poco a poco. Posteriormente se debe incrementar este voltaje pausadamente, un volt en cada instante hasta que el CCD se estabilice. A medida que el sistema Peltier enfría al CCD, se deberá ver que los valores de Ref y Reset se incrementan. Con el comando Focus/Mode del software AP245 se puede observar como se estabilizan las imágenes. Después de 15 minutos de haber iniciado el sistema, este estará listo para las primeras imágenes astronómicas.

6.1.2 Primeras imágenes astronómicas.



Imagen de la superficie de la Luna tomada con la cámara y un telescopio de 12" operando a una razón focal F/10. Tiempo de exposición de 0.2 segundos.

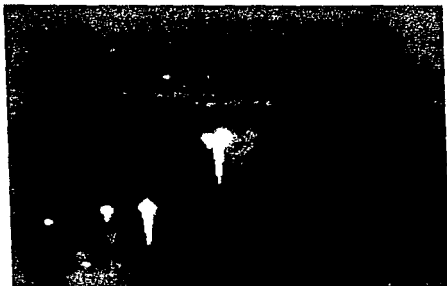


Imagen de la nebulosa de Orión (nebulosa M42) tomada con la cámara y un telescopio de 12" operando a una razón focal F/5. Tiempo de exposición de 15 segundos

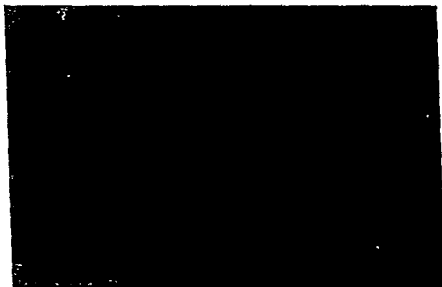


Imagen de un cuadro oscuro con tiempo de exposición de 15 segundos.



Imagen de un cuadro plano. Tiempo de exposición de 0.1 segundos.



Imagen del cometa Hale-Bop tomada a finales de abril de 1997 con la cámara digital y un telescopio de 12" operando a una razón focal $F/5$. Tiempo de exposición de 4 segundos.

6.2 Procesamiento de imágenes digitales.

6.1.1 Análisis de las imágenes.

El análisis de la imagen se utiliza para fines cuantitativos. En Astronomía el análisis incluye: Fotometría y Astrometría. La Fotometría se refiere a la medida de la luz total en una imagen y la Astrometría a la determinación del centro preciso de la luz en las imágenes estelares.

El trabajo básico en una rutina fotométrica es determinar cuanta cantidad de luz de los valores del arreglo de píxeles está en la región de la estrella y cuanta luz habría recibido del cielo si la estrella no estuviera ahí. La diferencia entre estas dos medidas es la brillantez de la estrella.

El trabajo de astrometría consiste en la localización del centro exacto de la estrella, a consecuencia de que la luz de una estrella en un CCD no se concentra en un solo punto, se debe determinar cuanta luz incidió en el CCD proveniente de la estrella y localizar la posición promedio de los píxeles más iluminados.

La posición del centro de la estrella se da como una fracción de píxeles. En el plano focal es de solo unas cuantas micras o, dependiendo del telescopio, es de solo unos segundos de arco.

6.1.2 Escalas.

El escalamiento de las imágenes altera la escala de brillantez de las imágenes. Es útil para permitir que sean visibles la mayoría de los datos que acompañan a la imagen. El escalamiento puede ser tan sencillo como un escalamiento lineal en el cual un rango de píxeles se "comprimen" para mostrar una mayor brillantez o, puede ser tan complejo como un histograma, en el cual los valores de los píxeles en la imagen original son forzados a ajustarse en otra distribución óptima predeterminada de valores de brillantez.

Dependiendo de lo que se quiere mostrar de la imagen, el escalamiento proporciona los medios para un rango de brillantez más amplio o para mejorar la visibilidad de detalles diminutos como, por ejemplo, los detalles planetarios.

6.1.3 Filtraje y restauración de las imágenes.

Las imágenes que alcanzan al CCD son previamente perturbadas por la atmósfera y la óptica del telescopio, oscureciéndolas y ocultando sus detalles finos. El filtrado de las imágenes restaura aquellos detalles perdidos, lo que proporciona al CCD la capacidad de capturar detalles muy finos en noches con condiciones imperfectas de observación.

La clave de la restauración es estimar en que medida se degradó la imagen original. Para el cálculo de esta estimación, el software de restauración intenta determinar la forma en que se habría observado la estrella bajo condiciones de observación perfectas y con una óptica también perfecta. La restauración de las imágenes requiere de una cantidad enorme de ensayos y por consiguiente, tiende a ser un proceso lento.

Las técnicas de filtrado pueden mejorar la visibilidad de las características de bajo contraste, presentes en las imágenes, sin cambiar en contraste global dentro de la imagen. Un ejemplo es una técnica llamada "Unsharp masking" que se utiliza para revelar detalles estructurales diminutos en una nebulosa o galaxia que debido a su bajo contraste, son muy difíciles de visualizar sus características, tal como aparecen en la imagen original. Después del filtraje se pueden observar las diferencias.

6.1.4 Calibración final de la imágenes.



Imagen original. Tiempo de exposición de un segundo.

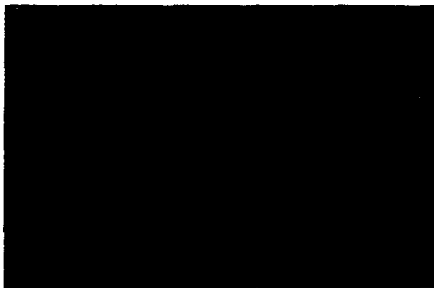


Imagen de un cuadro oscuro, es decir, imagen realizada cubriendo al CCD de cualquier luz. Tiempo de exposición de un segundo.

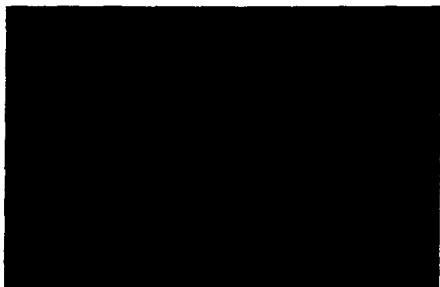


Imagen de un cuadro plano. Tiempo de exposición de 0.1 segundos.



Imagen resultado de sustraer la imagen de cuadro obscuro de la imagen original.



Imagen resultado de dividir la imagen anterior con la imagen de campo plano.



Imagen resultado de aplicar un filtro tipo Sharpen a la imagen anterior. Se utilizó el programa de procesamiento de imágenes digitales Superfix.



Imagen resultado de aplicar una operación de SUMA a la imagen anterior, haciendo uso del mismo programa de procesamiento. Esta es la imagen final calibrada y procesada.

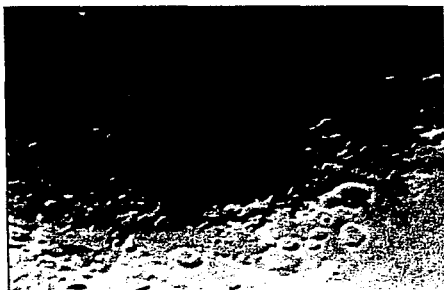


Imagen procesada de la superficie de la Luna.



Imagen procesada de la nebulosa de Orión.

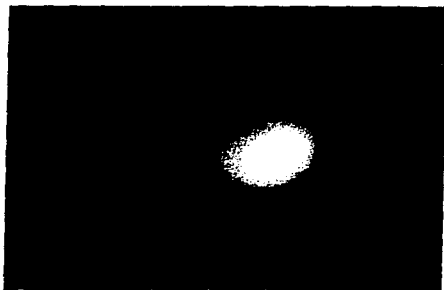


Imagen procesada del cometa Hale-Bopp.

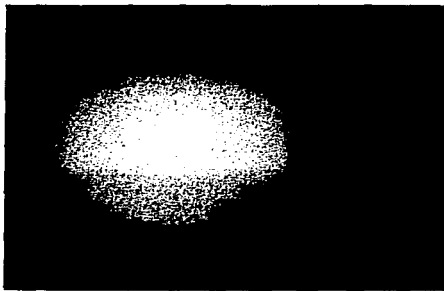


Imagen original del planeta Jupiter tomada con la cámara digital y un telescopio de 12" operando a una razón focal F/35. Tiempo de exposición de dos segundos. La imagen fué amplificada 50% utilizando el software Superflex.

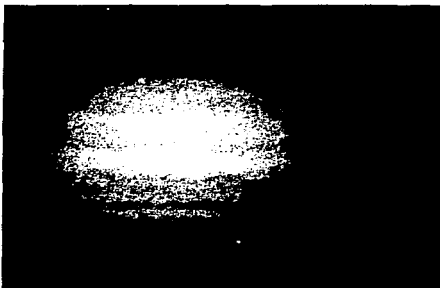


Imagen final procesada del planeta Jupiter. Debido a la baja resolución de la impresora no pueden apreciarse los excelentes detalles de su superficie, tal como se pueden ver en la pantalla de la computadora.

Conclusiones.

El camino no ha sido sencillo pero llegamos a la meta establecida: construir una cámara digital de fabricación "casera" a un precio muy bajo, comparado con los dispositivos que existen comercialmente, pero que cuenta con características tecnológicas que rivalizan con los mejores dispositivos que hay disponibles.

Debemos dejar claro que este trabajo no fué un desarrollo de diseño de ingeniería, sino una recopilación de información de dispositivos prototipo que podrían ser implementados para lograr el desarrollo de la cámara digital.

La elección de proceder a la fabricación de una cámara ubicada en la categoría dos propuesta, se debió principalmente a las siguientes tres razones:

a) la baja diferencia en precio (\$ 147.43 dólares) con respecto a la fabricación de una cámara de la categoría uno.

b) la idea de contar con un dispositivo de 12 bits lo que proporciona un total de $2^{12}=4096$ niveles de brillantez, comparado contra una cámara de 8 bits que ofrece $2^8=256$ niveles de brillantez.

c) la fabricación de una cámara de categoría 3 o superior, además de ser muy costosa (mínimo \$ 1,368.26 dólares) tecnológicamente es mucho más complicada su construcción debido al incremento de dispositivos electrónicos. Una cámara de categoría tres podría ser una excelente solución para un club de Astronomía.

Para el desarrollo de este trabajo se consiguió información de diversos prototipos de cámaras de varios fabricantes de dispositivos digitales y solo se valoraron aquellas alternativas que no excedieran los \$ 700.00 dólares considerando que se trata del desarrollo de un producto "casero" y por consiguiente los dispositivos que integran la cámara debían ser capaces de construirse en casa o en algún taller mecánico o de torneado a un precio bajo.

De esta manera se eliminó el uso de dispositivos que aunque ofrecieran una mejor alternativa, permitieran ser implementados más fácilmente, como por ejemplo:

a) el sistema de alimentación de la cámara podía implementarse mediante una tarjeta de interfase, pero esta solución requería de mayor esfuerzo en cuanto a diseño, tiempo y precio; razón por la cual se eligió una fuente de fabricación sencilla con el uso de componentes electrónicos menos complejos, algunos de los cuales, incluso ya se tenían debido a prácticas escolares pasadas.

b) el sistema de enfriamiento podía implementarse también mediante una solución de aire comprimido o un sistema termoeléctrico, sin embargo, aunque no representaban soluciones caras, si resultaba difícil su implementación.

La pauta definitiva para la fabricación de esta cámara de 12 bits la marcó un fabricante de dispositivos digitales que ofrecía las tarjetas impresas junto con el software de operación para el semi-conductor CCD y algunas herramientas de prueba para la electrónica. Adicionalmente, tenía disponibles algunos modelos prototipos para la fabricación de la cámara que no son del tipo comercial, por varias consideraciones de diseño y precio.

Una vez resuelto el problema de análisis y diseño de la cámara, la construcción no parecía sencilla de resolver. Hubo necesidad de parar y retroceder en nueve ocasiones, debido a situaciones difíciles de resolver durante la construcción de la cámara. Incluso se tomaron algunas decisiones que parecían no tener una respuesta clara, sin embargo, durante las primeras pruebas en las que se vislumbraba una actividad normal en la cámara, el ánimo cambió de modo tal que la afinación final con base a prueba y error, aunque fué un proceso largo y tedioso, no resultó pesado.

Las fotografías digitales presentadas hablan por sí solas de la realización de este dispositivo de gran calidad.

Una cámara digital y un telescopio pequeño o incluso un par de binoculares, bajo cielos oscuros, es capaz de mostrarnos la maravillas del espacio profundo en todo su esplendor y, con el uso de un telescopio potente se pueden alcanzar incluso los límites del universo observable.

Como puede apreciarse en las fotografías digitales presentadas en este trabajo, el uso de la cámara digital es potencialmente alto, abriendo a los aficionados a la astronomía campos de gran interés como pueden ser los que a continuación se mencionan, por citar algunos de ellos.

Fotometría estelar.

La clave para un buen trabajo fotométrico estelar, es tomar imágenes digitales mediante el uso de filtros que puedan definir los colores fotométricos estándares. Cuando las imágenes digitales están bien calibradas, estas contienen un registro fiel de la brillantez de cada estrella con una precisión de pocas centésimas de diferencia de la magnitud real. De esta manera se podría hacer fotometría de estrellas variables desde aquellas que tienen un periodo largo hasta las que se eclipsan cada minuto.

Fotometría de nebulosas planetarias.

La mayoría de las nebulosas planetarias no son observables a simple vista. Con el uso de un telescopio potente y la cámara digital se podría realizar un estudio del diámetro y brillantez de las nebulosas planetarias conocidas.

Fotometría de galaxias.

Uno de los inconvenientes frecuentes dentro del campo de la astronomía para aficionados es la inconsistencia de las publicaciones sobre las magnitudes de las galaxias. La brillantez de una galaxia puede ser medida directamente desde su fotografía digital.

Astrometría y fotometría de asteroides.

Existen muchos asteroides y solo unos pocos astrónomos. Tomando las medidas adecuadas, se podrían medir las posiciones de objetos estelares, a partir de imágenes digitales, hasta con una exactitud de pocas décimas de segundos de arco.

Posiciones de cometas.

Durante la aparición de un cometa, se necesita conocer la posición exacta de este sobre el fondo del firmamento. La cámara digital y un telescopio permiten registrar un cometa y entonces medir la posición del centro de la luz del cometa con respecto a las estrellas del fondo.

Observación de estrellas binarias.

Con la cámara digital se pueden hacer medidas de los ángulos y separaciones de las estrellas binarias.

Monitoreo de características planetarias.

Las imágenes planetarias de alta calidad pueden ser utilizadas para estudios, por ejemplo, de las nubes Jovianas, el avance y retroceso de los casquetes polares en Marte, eclipses lunares en Saturno.

En términos generales, con el auxilio de un dispositivo tecnológico como lo es la cámara digital, todo entusiasta del firmamento tiene la capacidad de ayudar en la exploración del espacio de una manera científica o simplemente gozar de la grandeza del universo.

Apéndice.

Apéndice A.

Cuidado personal y procedimientos de descarga electrostática.

A.1 Corriente Alterna.

Durante la construcción de la cámara se estará en contacto con materiales electrónicos y se llevarán a cabo tareas con un cierto potencial de daño. Si se utilizan las técnicas adecuadas no existirá ningún motivo para sufrir algún accidente o dañar la electrónica de la cámara.

Cualquier dispositivo que haga uso de una toma de 120 V_{AC} es potencialmente mortal. Cuando se trabaja con una toma de corriente, la regla principal es: nunca trabajar con un circuito mientras esté conectado.

La idea es prevenir que un flujo de corriente circule por el cuerpo; para esto se deberán usar zapatos con suela de goma y cuando se realice una medición de un circuito AC se deberá mantener una mano dentro pegada al cuerpo de modo tal que cualquier error en la medición no haga que el flujo de corriente circule de una mano a la otra pasando por el corazón, que puede ser mortal.

Para una protección electrostática, uno mismo deberá "aterrizarse", es decir, conectarse a la muñeca de la mano una banda antiestática con una resistencia de 1 Mohm y dicha banda conectada a tierra. Con este procedimiento se podrá estar seguro de que no se tendrán cargas electrostáticas en los componentes y uno mismo estará aislado contra una descarga de corriente AC.

Si accidentalmente se toca un alambre de 120 V_{AC} mientras se esté usando la banda, la máxima corriente que podría fluir a través del cuerpo sería de 170mA. Aunque la banda puede proteger la vida, la sensación de un impacto no es recomendable. Un corto circuito es también muy peligroso, así es que se debe tener extremo cuidado en el aislamiento de los componentes positivos y negativos.

Los capacitores de la fuente de alimentación pueden almacenar una carga considerable, mucho tiempo después de haber desconectado la fuente, por lo que antes de tocar cualquier cosa se deberán revisar tanto las salidas AC como las DC y asegurarse que se encuentren totalmente descargadas.

Entre las salidas +/- 15 V_{DC} existe un potencial de 30 Volts, por lo que se debe tener cuidado aquí también, debido a que un toque entre estas dos terminales no sería nada agradable.

A.2 Descarga Electrostática.

Casi todos estamos familiarizados con una experiencia electrostática. Cuando caminamos por una alfombra o por un ambiente extremadamente seco, podemos sentir un chispazo electrostático. Una descarga como estas normalmente tiene unos 6,000 volts o más. Un voltaje de este tipo de unos 70 volts sería suficiente para dañar los componentes electrónicos de la cámara. Por lo tanto el secreto es evitar materiales que acumulen carga electrostática y usar la banda electrostática de aislamiento.

Las descargas electrostáticas dañan a los circuitos integrados porque sus componentes son extremadamente pequeños y la energía eléctrica de una descarga estática se concentra en un punto muy reducido del circuito integrado. Por ejemplo, las compuertas de los semiconductores MOS son de vidrio de sólo unos pocos de Angstroms de grueso, diseñados para operar a décimas de volts y este aislante se puede romper con voltajes altos aplicados o con descargas electrostáticas.

Por consiguiente, no se deberá trabajar en superficies plásticas, de goma, de formaica, fibras sintéticas y vidrio.

Es muy recomendable utilizar una mesa sin pintar, sin barnizar y sin recubrimientos de cera y utilizar una silla metálica o de madera sin pintar.

El piso del área de trabajo deberá ser de concreto, madera o asfalto. Asimismo, es muy recomendable usar ropa de algodón.

La recomendación general es no ponerse nervioso y sólo tomar las precauciones debidas, poner atención a la seguridad y a los hábitos de trabajo y así se podrán integrar todos los componentes electrónicos de manera segura y sobre todo, disfrutar de esta gran experiencia.

Apéndice B.

Trabajo con circuitos electrónicos.

B.1 Identificación de componentes electrónicos.

Resistencias.

Las resistencias normalmente se marcan con bandas de colores para identificar su valor. Estas bandas se encuentran más cerca de un extremo que del otro de la resistencia y se deberán leer desde el sitio que esta más cerca al extremo de la resistencia.

Este es el código de colores:

COLOR	VALOR
Negro	0
Café	1
Rojo	2
Naranja	3
Amarillo	4
Verde	5
Azul	6
Violeta	7
Gris	8
Blanco	9
Dorado	+/- 5%
Plateado	+/- 10%

Utilizando un ejemplo, la forma como se lee su valor es la siguiente. Una resistencia con los colores naranja-naranja-naranja dorado tendrá un valor de: el primer color es el dígito número uno: 3, el segundo color es el dígito número dos: 3, el tercer color es el número de ceros que acompañan a los dígitos primero y segundo: 3 ceros. Por lo tanto el valor de esta resistencia es de 33,000 ohms y la tolerancia es de +/- 5 %, es decir, que su valor real estará comprendido entre: 31,350 y 34,650 ohms. Algunas veces existe una quinta banda que indica la estabilidad de la resistencia expresada como un porcentaje de cambio de su valor por 1,000 horas de operación.

Los valores de esta quinta banda son:

COLOR	VALOR
Café	1 %
Rojo	0.1 %
Naranja	0.01 %
Amarillo	0.001 %

Otro ejemplo es: una resistencia con los colores amarillo-violeta-rojo-dorado-amarillo tendrá un valor de 1 Megaohm +/- 5% y una gran estabilidad, es decir, el 0.001% de variación después de 1,000 horas de operación.

Capacitores.

Los capacitores tienen tres números seguidos por una letra y están dados en Pico faradios (pF)

El primer y segundo número son el primer y segundo dígito de la capacitancia y el tercer número es el multiplicador o el número de ceros que acompaña a los dos primeros dígitos. La letra indica la tolerancia, una M es para $\pm 20\%$ y una K es para $\pm 10\%$

Un capacitor marcado como 102M tendrá un valor de 1, 0, 00, es decir 1,000 picofaradios o 0.001 microfaradios con una tolerancia de $\pm 20\%$. Otro marcado como 102K tendrá 120 picofaradios o 120pF $\pm 10\%$.

Los capacitores de tipo cerámica se pueden instalar en cualquier dirección debido a que no son polarizados. Sin embargo, en los electrolíticos si es necesario tener cuidado con la terminal positiva y negativa.

Diodos.

Los diodos tienen marcado su número de parte, por ejemplo, 1N3600, pero debido a su tamaño y forma, muchas veces es imposible leer su valores. El cátodo del diodo siempre se marca con una banda y esta banda corresponde a la línea recta del símbolo del diodo.

Transistores.

Los transistores tienen una letra y un número, como por ejemplo el 2N2978. Tres alambres salen del casco del transistor: el emisor, la base y el colector. Dependiendo del transistor estos alambres se pueden nombrar E, B y C

Para auxiliarse en la instalación correcta de los transistores, estos siempre son asimétricos. Un lado del casco es plano y la orientación del lado plano se muestra normalmente en los circuitos impresos.

Circuitos integrados.

Los circuitos integrados tales como los amplificadores, reguladores, y circuitos lógicos tienen letras y números, como por ejemplo : 74LS157. Normalmente vienen impresos otros números que corresponden al nombre del fabricante o quizá una fecha en código o lugar de la fabricación.

Los reguladores de voltaje de tres pines deben tener marcadas sus salidas como in, out y adj. Si no están bien marcadas las salidas, es necesario consultar las hojas de especificaciones técnicas de los fabricantes.

Multímetro.

Se recomienda el uso de un multímetro digital de 3 o 4 dígitos con las siguientes escalas de medición:

Ohms:	2K, 20K, 200K, 2M, 20M.
Volts DC:	200mV, 2V, 20V, 200V, 1000V.
Volts AC:	200mV, 20V, 200V, 750V.
Amperes DC:	20uA, 200uA, 2mA, 20mA, 200mA, 2A, 20A.
Amperes AC:	20uA, 200uA, 2mA, 20mA, 200mA, 2A, 20A.

Capacidad para medir transistores PNP Y NPN.

Apéndice C.

Construcción de un auto-guiador.

C.1 Construcción de la interfase serial.

Con la adición de una caja de interfase entre la computadora y el telescopio, la cámara desarrollada se podría utilizar como un guiador de alta precisión para el telescopio. Esta función la soporta completamente el programa de software. La nueva caja de interfase transfiere las señales de control de la computadora al sistema de conducción electrónico del telescopio.

El programa AP-245 puede utilizar el puerto serial de la computadora para enviar datos al sistema conductor del telescopio. El diagrama de la figura C1 muestra el circuito que recibe los datos seriales y los convierte para controlar al telescopio. Adicionalmente, si el telescopio utiliza un sistema de engranajes sincrónico, el software AP-245 soporta también la función de PEC (Periodic Error Correction) o corrección de errores periódica, lo que permite a los telescopios operar con mucha mayor precisión para el seguimiento exacto de objetos celestes.

El auto-guiador utiliza cuatro bits de datos del registro receptor serial para controlar los cuatro movimientos del controlador manual del telescopio. El método más simple para transmitir los bits de datos de control, es usar los relevadores del telescopio.

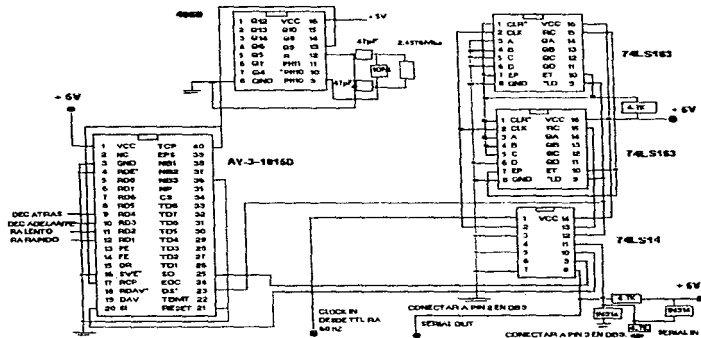


Figura C1.

Algunos telescopios cuentan con un conector RJ-11 para permitir una entrada RS-232 para el uso del seguimiento automático.

En el diagrama de la figura C2 se muestran algunas combinaciones de switches y se sugieren algunos métodos para conectar los relevadores para el control del telescopio en forma manual y por medio de la computadora.

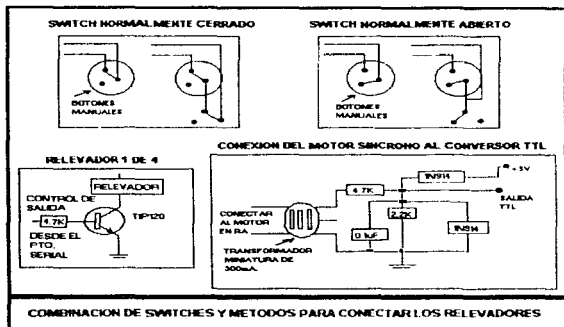


Figura C2.

Para tomar ventaja de la función PEC, el circuito eléctrico del telescopio debe ser capaz de administrar una señal de reloj compatible con circuitos TTL, es decir, alimentar directamente a los circuitos divisores. Algunos circuitos de los telescopios tienen una señal de reloj de un nivel alto, que varía de 0 a 12 Volts. Esta señal se debe reducir con un dispositivo divisor de voltaje antes de que se pueda utilizar para alimentar al circuito divisor 74LS163.

C.2 Operación del auto-guiador.

Con la caja de interfase del auto-guiador acoplada al telescopio vía el puerto serial, se puede hacer uso de la función Autoguide del software AP-245.

Se debe empezar por introducirse a la función seRIal dentro del menú de opciones del programa.

Primeramente se centra una estrella guía, utilizando la función Find. La estrella deberá ser suficientemente brillante como para ser guiada con una exposición de solo 1 segundo.

Dentro del menú Select se establece un valor bajo para el fondo del cielo. Posteriormente, se entra al menú Autoguide y se calibra el sistema con la tecla C. La rutina de calibración mueve la imagen de la estrella una pequeña distancia hacia la derecha y

hacia la izquierda en ascensión recta y, hacia arriba y abajo en declinación, de modo tal que el software sabe que tan rápidamente el sistema electrónico del telescopio reacciona ante los movimientos.

Se asegura la estrella guía mediante la tecla I. El software comienza la tracción de la estrella guía manteniéndola en el centro del monitor. Durante la tracción, el software muestra en pantalla los errores de guía que se han encontrado durante la tracción en pixeles. Así, un error de 1.5 pixeles se muestra como un valor de 15 en el lado izquierdo de la pantalla. A la derecha, se muestra la brillantez total de la estrella durante la tracción.

Si este número llega a ser cero, significa que la estrella guía se ha perdido. Esto puede ocurrir si interfiere una nube, o si los motores del telescopio no pueden centrar la estrella por alguna razón.

Bajo condiciones de operación razonables, es decir, con un telescopio cuyos motores no tienen demora en su tiempo de respuesta o con una estrella muy brillante, la cámara podrá guiar con una precisión de 1 segundo de arco.

Para obtener los mejores resultados se necesitará un poco de experiencia en su uso. Los siguientes parámetros pueden ser utilizados en el software.

T es para el tiempo de integración. Existe un tiempo de integración óptimo que permite el intervalo de muestreo más corto.

R es el tiempo de calibración de ascensión recta. El control de ascensión recta o RA se activa durante la calibración. El tiempo debe ser lo suficientemente largo como para permitir que la estrella se mueva al menos un décimo sobre el campo de acción, y lo suficientemente corto como para que no desaparezca del campo de visión.

D es el tiempo de calibración. Opera similar a R.

L es el nivel de seguro para la estrella guía. Los valores de pixeles mayores a este nivel se utilizan para calcular el centro de la estrella. Este valor debe ser más grande que el valor del fondo del cielo.

B este comando es usado para regular el retraso de operación de los motores del telescopio una vez que se les instruye a moverse. Por ejemplo, si se establece un valor de 12, es decir 1.2 pixeles, entonces en dondequiera que el software cambie la dirección del telescopio, este añadirá 1.2 pixeles al comando de corrección de error para cancelar el retraso de los motores.

C es para invocar la rutina de calibración. El nuevo ángulo de coordenadas del telescopio con respecto a la cámara se muestra en grados. Cuando se termina la rutina de calibración, el programa despliega las constantes de calibración de ascensión recta y declinación en pixeles esperadas en un movimiento de un segundo.

I es para colocar la estrella guía y empezar el seguimiento.

Z se utiliza solo para estrellas extremadamente débiles.

H utilizado para corregir valores de tracción.

M muestra el número de reflexiones en el sistema óptico.

A para poner el ángulo de transportación del sistema de coordenadas.

RAS es el valor de la constante de calibración lenta para la ascensión recta.

RAF, DECX, DECY son los valores de las constantes de calibración de la declinación.

Glosario de términos.

CCD.

Dispositivo acoplado por carga. Elemento sensor de luz.

Cúmulo.

Grandes conjuntos de estrellas agrupadas en números estimados entre cientos y miles. Son objetos impresionantes en fotografía.

Diodo.

Dispositivo electrónico que consiste en la unión de un semiconductor tipo N y un tipo P, esta combinación posee las propiedades de un rectificador.

Flip-Flop.

Circuito que puede mantener un estado binario indefinidamente hasta que se cambie por una señal de entrada para cambiar estados.

Galaxia.

Conjunto de estrellas, polvo y material interestelar cuya cohesión se debe a fuerzas gravitatorias.

Interfase.

Conexión que permite la adaptación de la computadora con un medio de transmisión de información en una forma utilizable.

Magnitud.

Clasificación de la cantidad de luz recibida desde una estrella observada a la tierra.

MOS.

Metal-óxido semiconductor o semiconductor de óxido de metal para circuitos digitales. Se usan en circuitos que requieren alta densidad de componentes.

Nebulosa.

Nube de polvo cósmico brillante que se posa entre las estrellas y las galaxias.

Nibble.

Grupo de cuatro bits, equivalente a medio byte.

LED.

Light emisor diode o diodo emisor de luz. Tipo de diodo en el que la energía rectificada la irradia en forma de luz.

PEC.

Periodic error correction o corrección de errores periódica es un sistema de corrección que poseen algunos telescopios modernos. Tiene un modo de "aprender" que permite establecer con mayor exactitud los valores más adecuados para una mejor tracción de objetos estelares.

Pixel.

Fotocelda o elemento de una imagen que determina la resolución espacial dentro de una imagen electrónica.

Razón focal.

Relación que existe entre el diámetro de un lente y la distancia focal de éste.

Semiconductor.

Propiedad de conducción en los metales. Esta característica ha permitido el desarrollo de circuitos integrados y microprocesadores.

Transistor.

Dispositivo electrónico que consiste básicamente en la unión de dos diodos y es capaz de amplificar una señal.

TTL.

Transistor-transistor logic o lógica de transistor a transistor. Es la familia lógica de componentes electrónicos con una extensa lista de funciones digitales.

Resolución.

Definición o calidad con la que se puede ver una imagen en pantalla.

Software de procesamiento de imágenes.

Programa de cómputo para que los usuarios manipulen fotografías digitales u otras imágenes.

Bibliografia.

Berry, Richard
Choosing and Using a CCD Camera
Willmann-Bell, Inc.
Virginia, U.S.A.
1992

Buil, Christian
CCD Astronomy
Willmann-Bell, Inc.
Virginia, U.S.A.
1991

Trueblood, Mark and Genet, Russell
Microcomputer Control of Telescopes.
Willmann-Bell, Inc.
Virginia, U.S.A.
1990

Berry, Richard
Introduction to Astronomical Image Processing
Willmann-Bell, Inc.
Virginia, U.S.A.
1991

Santa Barbara Instrument Group
Model ST-4 Star Tracking Imaging Camera
California, U.S.A.
1990

Berry, Richard, Kanto, Veikko and Munger, John
The CCD Camera Cookbook
Willmann-Bell, Inc.
Virginia, U.S.A.
1994

Inglas, Albert G.
Amateur Telescope Making
Libros uno, dos y tres
Scientific American, Inc.
New York, U.S.A.
1991

Morris Mano, M
Lógica Digital y Diseño de Computadores
Prentice Hall
México.
1982

Millman, Jacob and Halkias, Christos E.
Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems
Mc Graw Hill
Tokio, Japan.
1983

Gordon, Barry
Astrophotography
Featuring the fx System of Exposure Determination
Willmann-Bell, Inc.
Virginia, U.S.A.
1992

Martinez, Patrick
Astrophotography
Featuring the Techniques of the European Amateur
Willmann-Bell, Inc.
Virginia, U.S.A.
1987

Muirden, James
How to use an Astronomical Telescope
Simon & Schuster, Inc.
New York, U.S.A.
1988.

Muirden, James
The Amateur Astronomers Handbook
Harper & Row, Publishers
New York, U.S.A.
1991

Covington, Michael
Astrophotography for the Amateur
Cambridge University Press
New York, U.S.A.
1988

Nicolson, Ian
Astronomía
The Hamlin Publishing Group Ltd.
Editorial Bruguera
México
1980.

Baker, David y Hardy, David A.
Guía de Astronomía
Editorial Omega
Barcelona, España
1980

Duffet, Peter
Astronomy with your Personal Computer
Cambridge University Press
Massachusetts, U.S.A.
1985

McLaughlin, Dean B.
Introduction to Astronomy
Houghton Mifflin Company
Massachusetts, U.S.A.
1961

Software Bisque
The Sky
Astronomy Software for Windows
Colorado, U.S.A.
1990

Howell, Steve B.
Astronomical CCD Observing and Reduction Techniques
Astronomical Society of the Pacific
California, U.S.A.
1992

CCD Astronomy
The Magazine of Electronic Imaging
Sky Publishing Corporation
Massachusetts, U.S.A.
Publicación Cuatrimestral

Sky and Telescope Magazine
Sky Publishing Corporation
Massachusetts, U.S.A.
Publicación Mensual.

Astronomy Magazine
Kalmbach Publishing Corporation
Wisconsin, U.S.A.
Publicación Mensual.

Telescope Making Magazine
Kalmbach Publishing Corporation
Wisconsin, U.S.A.
Publicación Cuatrimestral.

Deep Sky Magazine
Kalmbach Publishing Corporation
Wisconsin, U.S.A.
Publicación Cuatrimestral.

El Universo, Revista
Sociedad Astronómica de México, A.C.
Subsecretaría de Investigación Científica y
Educación Superior de la SEP
Publicación Trimestral