

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE CIENCIAS

DISEÑO, CONSTRUCCION Y USOS DE UN ESPECTROFOTOMETRO
PARA LA INVESTIGACION EN LA ASTRONOMIA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS
(F I S I C A)

P R E S E N T A

ROBERTO ORTEGA MARTINEZ

MEXICO, D.F.

1986.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

00382
3
14



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.

I N D I C E

	PAG.
INTRODUCCION GENERAL.....	1
CAPITULO I DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL ESPECTROFOTOMETRO.....	3
CAPITULO II SISTEMA DE DETECCION Y AMPLIFICACION.....	17
CAPITULO III SISTEMA DE PROCESAMIENTO Y EXPOSICION DE DATOS.....	39
CAPITULO IV APLICACIONES ASTRONOMICAS Y RESULTADOS OBSERVACIONALES....	49
CONCLUSIONES.....	66
FIGURAS.....	70
TABLAS.....	85
GRAFICAS.....	97
APENDICES.....	104
BIBLIOGRAFIA.....	148

"DISEÑO, CONSTRUCCION Y USOS DE UN ESPECTROFOTOMETRO PARA LA INVESTIGACION EN LA ASTRONOMIA"

I N T R O D U C C I O N G E N E R A L

Se ha diseñado y construido un espectrofotómetro para ser usado en investigación astronómica. El sistema espectrofotométrico consta principalmente de tres partes: a) un espectrómetro, b) un sistema de detección y c) un sistema de procesamiento de información y despliegue de datos.

En el Capítulo I se describe ampliamente el diseño general del instrumento y se resumen las características mecánicas y ópticas. El espectrómetro contiene un arreglo óptico caracterizado por un mínimo de elementos, como son la rendija de entrada, filtros ópticos, espejos: colimador y cámara, rejillas de difracción y la rendija de salida situada en un disco que gira a una frecuencia de 30 Hz. Todo acomodado en un cuerpo mecánico de gran rigidez y que se sujeta a la platina de instrumentos de un telescopio astronómico Cassegrain.

En el Capítulo II se explica el principio del funcionamiento de los detectores y el concepto de ruido, detectividad, la electrónica de amplificación, filtraje electrónico y las condiciones de operación.

El sistema de detección consta de dos tipos de detectores intercambiables. El primero es un fotomultiplicador RCA-1P21 (seleccionado), sensible a la parte visible del espectro y el segundo un fotodetector de silicio (Si) EG-G sensible al rojo y cercano infrarrojo del espectro. Cada uno de los detectores con su amplificador de bajo ruido son enfriados a temperatura de hielo seco para disminuir el ruido térmico y aumentar la relación de señal a ruido (S/R).

La señal que proviene del tubo fotomultiplicador es integrada en un fotómetro que acepta señales en corriente, la amplifica y despliega en un medidor de corriente y prepara la señal para ser acoplada a un registrador galvanométrico o potenciométrico. Para el caso del fotodiodo de silicio (Si) se ha diseñado un amplificador de bajo ruido con una potencia equivalente de ruido (NEP $\leq 10^{-16}$ W).

En el Capítulo III se explica ampliamente el sistema de captura y procesamiento de datos, el funcionamiento de la microcomputadora MEK6800D1, los periféricos que tiene conectados y finalmente se detalla el programa de reducción de datos.

Las señales de los detectores son enviadas a un sistema microprocesador basado en el Motorola MCM6800 para ser sometida a diferentes operaciones aritméticas dadas por un programa previamente grabado en una memoria EPROM, para finalmente desplegar los resultados en forma impresa.

En el Capítulo IV se da una breve introducción al tema de "Estrellas Tempranas" y explican algunas aplicaciones astronómicas, se describe el método de trabajo observacional y se discuten los resultados obtenidos.

El diseño y la construcción del instrumento ha convertido a este sistema espectrofotométrico en un poderoso y útil sistema de observación astronómica el cual se caracteriza por su versatilidad, gran eficiencia, rapidez, y fácil operación. Los primeros resultados obtenidos con este instrumento han sido publicados y diferentes etapas de su diseño ha sido presentados en Congresos Internacionales y Nacionales de la especialidad según consta en la bibliografía.

Finalmente se incluyen las Conclusiones de este Trabajo de Tesis, así mismo el material al cual se hace referencia en el texto como son: Figuras, Tablas, Gráficas, Apéndices y Bibliografía.

CAPITULO I

DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL ESPECTROFOTOMETRO

1.1 Introducción

Existen varios problemas astronómicos asociados con la presencia de elementos químicos y variaciones de la intensidad de las líneas espectrales en estrellas, con la determinación de clases estelares, etc. Un método útil para resolver los problemas anteriores es combinar las técnicas de espectroscopía y fotometría para observar aquellos detalles espectrales de interés. En el caso particular de una línea espectral de cualquier elemento químico, presente en la atmósfera estelar, es importante comparar ésta con el continuo cercano; midiendo la línea y el continuo inmediato de cada lado de ésta.

El sistema espectrofotométrico, que se ha diseñado y construido para aplicaciones astronómicas se caracteriza por un mínimo de reflexiones ópticas, versatilidad y fácil operación; en el que se puede alinear su óptica, escoger las rendijas de entrada y salida, rejillas de difracción, filtros ópticos, así como diferentes sistemas de detección como fotomultiplicadores o detectores de estado sólido. Las señales son amplificadas y enviadas a un convertidor de voltaje a frecuencia; éste a su vez envía pulsos digitales cuya frecuencia es proporcional al voltaje analógico amplificado, los pulsos van al puerto de entrada de un sistema microprocesador MEK6800D1. La codificación de la información se hace utilizando sensores optoelectrónicos colocados a ambos lados de un modulador mecánico que selecciona la línea y el continuo del espectro estelar. En la captura de datos y su procesamiento se utiliza un sistema modular que consiste en un amplificador, una unidad de control y un sistema microprocesador que contiene una memoria EPROM de 2k bytes con un programa que procesa provisionalmente la información para finalmente desplegarla en forma impresa.

1.2 El Sistema Espectrofotométrico.

El sistema que se propone es el de usar un espectrofotómetro estelar que contiene un modulador mecánico que consiste en un disco giratorio en el cual están las rendijas de salida que alternativamente aceptan la línea espectral y el continuo de cada lado de la línea o cualesquiera detalles espectroscópicos que se deseen medir sus flujos luminosos. Como pueden ser, comparar entre sí líneas espectrales o diferentes continuos. Las rendijas tienen las dimensiones adecuadas para medir el ancho equivalente de la línea espectral y una cantidad similar de continuo. Están lo suficientemente espaciadas entre ellas para aceptar los detalles de interés del espectro estelar. Considerando las limitaciones que imponen el tamaño del detector y la resolución del instrumento, Fig. 1.

Por otro lado el diseño del espectrofotómetro estelar contiene muy pocos elementos ópticos, tal que las pérdidas por reflexión y absorción de radiación ultravioleta y visible del espectro, y por consiguiente tiene una mayor eficiencia. Además el diseño mecánico tiene varios sistemas que permiten que los cambios de rendija de entrada, filtros ópticos, rejillas de difracción y oculares, se realicen rápidamente. El colimador y la cámara son únicamente dos espejos paraboloídes fuera de eje.

El sistema de detección consta de dos tipos de detectores, un tubo fotomultiplicador RCA-1P21 (seleccionado entre varios del mismo tipo), sensible al cercano ultravioleta y visible del espectro, y un fotodetector de silicio (Si) EG-G SND-140 sensible al visible y cercano infrarrojo del espectro electromagnético. Cada uno de los detectores con su preamplificador de bajo ruido están encapsulados para evitar humedad y señales espurias, permitiendo únicamente el paso de luz a través de una lente de campo o de Fabry. Estas cápsulas a su vez están contenidas en cajas, especialmente diseñadas, que se llenan con hielo seco y poder trabajar a la temperatura de -75°C , para disminuir el ruido térmico de los detectores, permaneciendo constante la baja temperatura por aproximadamente 5 horas antes de ser necesario depositar más hielo seco. Las cajas frías están adosadas por el exterior del cuerpo principal del instrumento para facilitar su alineación óptica o intercambio si se desea.

La señal que proviene del tubo fotomultiplicador es enviada a un fotómetro que acepta señales en corriente, las amplifica y despliega la amplitud de éstas en un medidor de corriente, a su vez prepara la señal para acoplarla a registradores galvanométricos o potenciométricos. Actualmente todo el sistema es modular cuenta por separado con un sistema electrónico que presenta en forma digital las medidas proporcionales a las intensidades de las líneas espectrales; para el caso del fotodiodo de silicio (Si) se ha diseñado un amplificador de

bajo ruido. Las señales que provengan de cualquiera de los detectores son filtradas para ruido de alta frecuencia y la señal es pasada a un convertidor de voltaje a frecuencia y ésta a su vez a un sistema de procesamiento basado en el microprocesador $\mu P6800$ para ser sometida a diferentes operaciones aritméticas, necesarias dadas por un programa previamente grabado en memoria ROM para finalmente desplegar el resultado en una impresora Trendcom 100.

1.3 Características y Parámetros del Espectrofotómetro.

El diseño óptico y mecánico del espectrofotómetro estelar se muestra en la Fig.2, el cual contiene los elementos ópticos, el sistema de selección de la rejilla de difracción, la posición del modulador mecánico (chopper) y los periscopios de observación, todo montado dentro del cuerpo principal. El detector y la caja fría quedan adosados al exterior del instrumento, el sistema fotométrico y de registro son unidades separadas. En el diseño fue necesario tomar en cuenta el tipo de telescopio a usar para determinar los principales parámetros del espectrofotómetro; a continuación se enumeran los más importantes, Tabla 1.

El instrumento que se muestra es el de un espectrógrafo con un sistema de detección fotométrica, constituyendo un sistema espectrofotométrico estelar que es atornillado a la platina de instrumentos del telescopio, localizada en la base de la celda que guarda al espejo primario y haciendo coincidir el foco del espejo secundario con la rendija de entrada del instrumento. A continuación se definen los siguientes parámetros ópticos: w apertura de entrada (ancho de la rendija de entrada), h (largo de la rendija de entrada), un colimador con diámetro, d_{col} , y distancia focal, f_{col} , una rejilla de difracción plana de ancho W , una cámara con diámetro d_{cam} , y distancia focal, f_{cam} ; en el plano focal de ésta se tiene el disco modulador con la(s) rendija(s) de salida; a continuación la lente de campo (Fabry) del sistema de detección fotométrico. De los datos de la Tabla 1 se determinan (en segundos de arco y milímetros) las siguientes características del espectrofotómetro.

Los ángulos subtendidos por la rendija en el cielo son:

$$\psi = \frac{w}{f_{td}} = 4.1'' \quad \text{---(1.1)}$$

$$\psi' = \frac{h}{f_{td}} = 68.7'' \quad \text{---(1.2)}$$

Los ángulos subtendidos por la rendija en el colimador son:

$$\eta = \frac{w}{f_{col}} = 96.1'' \quad \text{---(1.3)}$$

$$\eta' = \frac{h}{f_{col}} = 1601'' \quad (1.4)$$

Las dimensiones de la rendija proyectadas en el plano focal de la cámara.

$$w' = w \left(\frac{f_{cam}}{f_{col}} \right) = 0.15 \text{ mm} \quad (1.5)$$

$$h' = h \left(\frac{f_{cam}}{f_{col}} \right) = 2.5 \text{ mm} \quad (1.6)$$

Para el caso de la ecuación (1.1), los objetos estelares de hasta $4''$ estarán completamente contenidos en el ancho de la rendija, para objetos más extendidos parte de la luz no pasará al instrumento y será reflejada al periscopio de campo, junto con los demás objetos que se observen en el campo de visión.

Para las ecuaciones (1.3) y (1.4) los ángulos que subtienden las dimensiones de la rendija sobre el colimador son menores que el diámetro de éste por lo tanto toda la luz que entre por la rendija incide completamente en el colimador y será reflejada en forma colimada (radio constante) hacia la rejilla de difracción. Finalmente las ecuaciones (1.5) y (1.6) nos dan el tamaño de la imagen de la rendija de entrada, que es el tamaño del espectro en el plano focal de la cámara; lugar donde es colocado el modulador mecánico con sus rendijas para observar los detalles espectrales de interés, generalmente la línea espectral y su continuo cercano, en ambos lados.

1.4 La Rejilla de Difracción.

El elemento óptico central del espectrómetro es la rejilla de difracción de la cual describo algunas de las propiedades más importantes y que han sido incorporadas al diseño del instrumento.

La utilidad de una rejilla depende del hecho de que existe una serie única de ángulos para los cuales dada la distancia de separación entre los surcos y la longitud de onda, la luz de todos los surcos está en fase. En otras palabras, la interferencia constructiva ocurre cuando la diferencia de trayectoria óptica entre rayos de facetas (surcos) adyacentes es un número entero de longitudes de onda. E. Hecht y A. Zajac (1980). El resultado es la bien conocida expresión dada por la ec. (1.7).

$$m\lambda = a (\sin \alpha \pm \sin \beta) \quad (1.7)$$

donde α y β son los ángulos de incidencia y difracción, respectivamente, a la constante de la rejilla (separación entre surcos) y m el número del orden para una longitud de onda λ . Si α y β están en el mismo lado con respecto a la

normal de la rejilla, sus signos son iguales, si están en lados opuestos a la normal, sus signos son opuestos, Fig. 3. La Ec. (1.7) también es válida para rejillas de difracción por transmisión.

Suponiendo luz colimada incidente a la rejilla, esto es un ángulo de incidencia constante, se puede escribir la dispersión angular diferenciando la ec. (1.7) de la siguiente forma:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{a \cos \beta} = \frac{\operatorname{sen} \alpha \pm \operatorname{sen} \beta}{\lambda \cos \beta} \quad -(1.8)$$

Si una rejilla es usada en un orden bajo, $m=1$ ó 2 y un número grande de surcos, a pequeña, se obtiene gran dispersión angular. Por otro lado, esto también puede ser obtenido con una rejilla con un menor número de surcos, a grande, si el orden m es grande. El tipo de rejillas que usamos en el instrumento permiten ser usadas en órdenes bajos; aquellas rejillas diseñadas para ser usadas en valores grandes de m ($\gg 20$), y con ángulos grandes α y β son conocidas como echelles.

De la Fig. 3 se ve que la Ec. (1.7) puede también ser escrita como.

$$m\lambda = 2a \left(\operatorname{sen} \theta \cos \frac{\varphi}{2} \right) \quad -(1.9)$$

donde

$$\alpha = \theta + \frac{\varphi}{2} \quad \text{y} \quad \beta = \theta - \frac{\varphi}{2} \quad -(1.10)$$

En muchos espectrómetros de rejilla los ángulos α y β no son muy diferentes, para nuestro caso sí los son. La diferencia φ entre estos ángulos está determinada por consideraciones mecánicas, en el instrumento se tiene $\varphi = 53.5^\circ$, de tal forma que los haces colimado y difractado apenas libran uno del otro para la localización de la óptica del espectrómetro. Para el caso particular de $\alpha = \beta$ y $m=1$, conocida como condición de Littrow, es la que se usa para caracterizar a las rejillas en una cierta longitud de onda λ ; para este caso $\lambda = 2a \operatorname{sen} \theta$, por lo tanto la dispersión angular en autocolimación se escribe como $\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2}{\lambda} \operatorname{tg} \beta$; por consiguiente para una longitud de onda particular la dispersión angular depende únicamente del ángulo al cual la rejilla está siendo usada. Las rejillas convencionales están diseñadas para ser usadas con ángulos θ pequeños, mientras que las echelles están generalmente diseñadas para ser usadas para θ grandes.

Tomando en cuenta la óptica del espectrómetro para proyectar la imagen del espectro dado por la rejilla sobre la rendija de salida, se tiene la dispersión lineal con α constante; esto es,

$$D = \frac{d\lambda}{dS} = \frac{a \cos \beta}{m f_{cam}} \quad -(1.11)$$

donde f es la longitud focal de la lente o la cámara que enfoca el espectro. Conceptualmente significa la separación espacial (S) en el plano focal de la cámara entre dos líneas espectrales de igual intensidad.

Las Tablas 3 y 5 muestran los valores que dan las dos rejillas con las que cuenta el instrumento. Estos valores se obtienen al girar un ángulo Θ para obtener diferentes longitudes de onda λ del espectro. Claramente se ve la variación de α y β , como de la dispersión lineal. El cambio de Θ se logra al rotar el dial localizado al exterior del instrumento para este propósito. Ver Fig. 2 y Apéndice A para mayor explicación técnica.

El intervalo de longitudes de onda, para los cuales la superposición de órdenes adyacentes no sucede, es llamado libre intervalo espectral F_λ . El intervalo espectral $\Delta\lambda$ es la diferencia de longitud de onda entre dos longitudes en órdenes sucesivos al mismo ángulo. Esta diferencia se determina igualando $m(\lambda + \Delta\lambda) = (m+1)$, de donde se obtiene:

$$F_\lambda = \Delta\lambda = \frac{\lambda}{m} \quad -(1.12)$$

Cuando el orden es pequeño el intervalo espectral libre es grande y órdenes que no se deseen son eliminados fácilmente con filtros de color. Cuando m es grande, como es el caso de las rejillas echelle, es necesario separar órdenes sucesivos usando otro elemento dispersivo auxiliar, puede ser otra rejilla o un prisma. Las características de los filtros usados se muestran en la Fig. 6 y Tabla 1.

Por otro lado, las rejillas de difracción están construidas de tal forma que la geometría de sus surcos permite que la mayoría de la luz de una longitud de onda específica es enviada en un sólo orden. Esas rejillas son conocidas como de luz brillante (blaze). En términos de φ en la Fig. 3 se tiene que $\lambda_b = 2a \sin \frac{\varphi}{2}$. La longitud de onda blaze en otros órdenes está dado por $\lambda_m = \frac{\lambda_b}{m}$.

El espectrofotómetro estelar cuenta en su construcción con dos rejillas de difracción reflectoras, siendo usadas en los órdenes bajos, con la longitud de onda blaze en el cercano infrarrojo y con la dispersión lineal deseada para las líneas espectrales de interés anteriormente identificadas. En las Tablas 3 y 5 se listan todas las características de las rejillas haciendo referencia a la discusión anterior. En las Tablas 4 y 6 se tiene la eficiencia de la rejilla y del detector de silicio en función de la longitud de onda para $m = 1$ y 2 .

1.5 Parámetros Importantes.

En el diseño del espectrofotómetro es importante conocer otros parámetros que nos dan información sobre las posibilidades del instrumento y cual es su comportamiento esperado al observar fuentes luminosas puntuales (estrellas) y fuentes luminosas extendidas (galaxias, nebulosas, etc.), a continuación discutiré brevemente los parámetros más importantes. Una primera consideración para espectrometros astronómicos está dada por Code y Lillier (1962) y se refieren a la pureza espectral o pasabanda, a la rendija de salida, para un ancho de rendija de entrada. Esta dada por

$$\delta\lambda = \frac{w}{f_{col} \left(\frac{d\beta}{d\lambda} \right)} = \frac{A\psi}{d_{col}} \frac{1}{\frac{d\beta}{d\lambda}} \quad -(1.13)$$

donde ψ es el ángulo subtendido por el ancho de la rendija en el cielo, A es el diámetro del espejo primario del telescopio y d_{col} diámetro del colimador. Claramente se ve de la expresión anterior que una mejor pureza espectral (menor $\delta\lambda$), para un telescopio dado y un ángulo en el cielo, se obtiene al incrementar el diámetro o la dispersión angular del elemento dispersor. La Tabla 2 muestra los valores de la pureza espectral que se tienen para las diferentes longitudes de onda de interés por las rejillas de difracción con las que cuenta el instrumento. Como información mencionó que Schroeder (1967) reporta en la literatura purezas espectrales desde 0.5 Å hasta 12.5 Å para objetos estelares y nebulosas usando un espectrómetro con rejilla echelle de 75 líneas/mm en combinación con rejilla convencional de 600 líneas/mm.

Un segundo concepto de importancia está en el "Poder de resolución" del instrumento, definido como: la razón entre la longitud de onda escogida λ y la mínima resolución de la diferencia de longitud de onda $\delta\lambda$; esto es, $R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$.

En términos de la Ec. (1.13) se tiene que

$$R = \left(\frac{d_{col}}{A\psi} \right) \lambda \frac{d\beta}{d\lambda} \quad -(1.14)$$

De ésta expresión se ve claramente que la potencia resolutora para un telescopio dado, con un ancho angular de la rendija depende del tamaño del colimador, de la dispersión angular de la rejilla de difracción y la longitud de onda. En la Tabla 2 se muestra el incremento de la resolución con la longitud de onda que es lo que necesitamos para longitudes de onda largas.

Como la mayoría de las fuentes luminosas astronómicas son débiles, la cantidad de luz transmitida por la combinación telescopio - espectrómetro es importante tomarla en cuenta. Jacquinot (1954 y 1960) definió la "Transferencia" de luminosidad y su estrecha relación con el poder de resolución R. Esta

transferencia de luminosidad es el producto del área del colimador, el ángulo sólido de la rendija de entrada subtendida en el colimador y la transmitancia del espectrógrafo. De la relación de Schroeder (1970) escribimos la transferencia como

$$L = \tau \pi \left(\frac{d_{col}^2}{4} \right) \eta \eta' = \tau \pi \left(\frac{D_{tel}^2}{4} \right) \psi \psi' \quad -(1.15)$$

cuyas unidades son mm^2 esteradian y las características del telescopio han sido incorporadas en la segunda parte de la ecuación. Más adelante explico como se puede determinar la transmitancia τ , para un espectrógrafo acoplado a un telescopio; por el momento menciono que está relacionado con la absorción que sufre la luz al interactuar con los diferentes elementos ópticos del instrumento.

Un resultado importante se obtiene al multiplicar la transferencia L por el poder de resolución; esto es, la Ec. (1.14) y la segunda forma de la Ec. (1.15) para obtener la Ec. (1.16):

$$L \times R = \tau \pi \left(\frac{d_{col}^2}{4} \right) (A \psi') \lambda \frac{d\beta}{d\lambda} \quad -(1.16)$$

Este producto se interpreta como el "Rendimiento total" del instrumento. Para incrementar este producto para un telescopio dado se necesita un colimador más grande y/o una mayor dispersión angular. Esto puedo hacerlo en el instrumento al cambiar la relación focal hasta su máximo diámetro; lo segundo rotar la rejilla de difracción para la longitud de onda de interés. Las dos operaciones se pueden hacer fácilmente en el instrumento ya que los mecanismos que sujetan al colimador y a la rejilla de difracción cuentan con perillas y dial, sobre la pared exterior del instrumento. Las relaciones focales que se pueden tener son las que tienen algunos de los telescopios con los que cuenta la Universidad Nacional Autónoma de México como son $f/13.5$ para el telescopio de apertura $A=840$ mm del Observatorio en San Pedro Mártir, Baja California y un $f/15$ para el telescopio de apertura $A=1000$ mm del Observatorio de Tonantzintla, Puebla.

Por otro lado es importante estimar el valor del coeficiente de transmisión (transmitancia) τ en la ecuación (1.15); Si suponemos que podemos escribir a éste como $\tau = E_0 E_e$, donde E_0 y E_e son los coeficientes de transmisión del sistema óptico y del elemento espectrométrico del instrumento. Para la longitud de onda blaze $\lambda_B (1 \mu\text{m})$ de la rejilla de 600 $1/\text{mm}$ se tiene $E_e \sim 0.84$ y dos superficies reflectoras recién aluminizadas ~ 0.9 cada una y una superficie transmisora (lente de Fabry) que transmite ~ 0.96 . Se tiene:

$$\tau = E_o E_e \sim 0.9^2 \times 0.84 \times 0.96 \sim 0.65$$

-(1.17)

El valor del coeficiente de transmisión τ de nuestro instrumento es mayor que el que normalmente se encuentra en la literatura. Meaburn (1970) reporta para un espectrómetro que utiliza más lentes un coeficiente de transmisión ~ 0.5 y para el espectrógrafo de una sola rendija, bajo orden en el foco Cassegrain del telescopio de 5 metros del Observatorio de Monte Palomar una $\tau \sim 0.23$, considerando que $E_e \sim 0.7$; Jacquinot (1954) reporta una $\tau \sim 0.4-0.7$ para un etalón de Fabry-Perot.

El mejor coeficiente de transmisión en nuestro instrumento se debe claramente a que usamos un mínimo de superficies ópticas reflectoras y la rejilla de difracción en la longitud de onda de su máxima eficiencia; ya que tanto la rendija de entrada y las rendijas de salida de nuestro espectrógrafo no absorben luz. Es importante hacer notar que estos cálculos suponen que todos los elementos ópticos del instrumento están recién aluminizados y que no se tiene polvo ni humedad depositado sobre ellos.

De las ecuaciones anteriores y considerando una $\tau \sim 0.7$ y una $L = 4.5 \times 10^{-3} \text{mm}^2$ -esteradian se resumen en la Tabla No. 2 los principales valores que se obtienen para la longitud de onda de interés utilizando las dos rejillas de difracción con una dispersión lineal dada por la ecuación (1.11).

Como el espectrofotómetro será usado principalmente en el cercano infrarrojo (longitudes de onda más largas), claramente se ve que la dispersión angular aumenta proporcionando una dispersión lineal y resolución suficientemente buenas para distinguir los detalles de las líneas espectrales de interés; a su vez el producto $L \times R$ aumenta en aproximadamente un factor de tres, mejorando el rendimiento.

La relación (1.16) y los valores de la Tabla 2 son más útiles cuando se comparan varios espectrómetros astronómicos, para ser usados en el mismo telescopio bajo las mismas condiciones de variación de diámetro angular aparente del objeto luminoso observado (centelleo), o por la vibración de la imagen debido al movimiento del aire en dirección del telescopio, conocido como "seeing". Cuando se consideran diferentes condiciones de seeing, o fuentes extendidas es necesario también tomar en cuenta la luminancia de la fuente en la rendija de entrada del espectrómetro. De la definición de luminancia vemos que para una fuente puntual $L \propto \left(\frac{1}{\Delta\theta}\right)^2$, mientras que para una fuente extendida de brillo superficial uniforme $L = \text{constante}$ cuando el diámetro angular de la fuente es grande comparado con el límite del seeing. Si estos resultados los incorporamos a la Ec. (1.16), se encuentran las siguientes expresiones para los productos de los flujos transmitidos y resolución:

$$\Phi \times R = \begin{cases} Kz \left(\frac{d_{\omega} A}{\psi'} \right) \lambda \frac{d\beta}{d\lambda} & \text{Para fuentes puntuales} & -(1.18a) \\ Kz (d_{\omega} A \psi') \lambda \frac{d\beta}{d\lambda} & \text{Para fuentes extendidas} & -(1.18b) \end{cases}$$

donde K es una constante y Φ el flujo.

De la Ec. (1.18a) para un buen seeing (ψ' pequeño) resulta en una gran transmisión del producto flujo-transmisión. Si el disco del seeing es mayor que el ancho angular de la rendija de entrada ($\psi' > \psi$), entonces la resolución se incrementa pero a expensas del flujo transmitido. En la Ec. (1.18b) el factor ψ' no está relacionado con el seeing; es simplemente la altura angular de la rendija de entrada proyectada en el cielo. En las dos expresiones se supone que el perfil del área por donde pasa la luz es rectangular, y que dentro de esta área la luminancia es constante. Estas suposiciones no son estrictamente ciertas pero ayudan a ilustrar los conceptos de rendimiento, flujo transmitido, y resolución.

1.6 Modulación de la Señal.

Es común en fotometría estelar modular a una o varias frecuencias la radiación que se desea medir; algunas de las razones para esto es que la amplificación en ac es más confiable que la amplificación en dc, la corriente oscura se elimina, el cociente de señal de ruido (S/R) mejora al amplificar a la frecuencia de modulación. En nuestro caso la modulación de la radiación cuasimonocromática y seleccionada proveniente del espectro estelar dado por la rejilla de difracción, se hace con un disco giratorio (chopper) que contiene seis sectores de 59° cada uno y que contiene a las rendijas que alternativamente aceptan la línea espectral (l), el continuo espectral (c) y una compensación electrónica (z) en cada revolución del disco, Fig. 1. Esta radiación incide en el fotodetector para posteriormente ser amplificada y enviada al sistema de procesamiento y despliegue de las señales medidas, que son proporcionales a las intensidades de los detalles espectrales considerados. El tipo de señal dado por el amplificador es el de la Fig. 13, donde en 1 rev se tienen l, c, z que son moduladas electrónicamente por las señales de los sensores A, B, C del chopper que están localizados en las rendijas de radio menor. Esta señal cuadrada ocurre si la imagen de la fuente (línea espectral) es muy angosta, o si ésta y el detector son muy pequeños en comparación con la rendija l del modulador mecánico.

En la Tabla 7 se listan las medidas hechas a las rendijas del chopper, con un microscopio Geartner con despliegue de lectura digital. Este disco fue construido en el taller mecánico del Centro de Instrumentos donde se consiguió que la precisión de las rendijas l y c sean de 1 ± 0.1 mm. Por otro lado, el factor de trabajo del chopper se define como la razón del periodo abierto de un ciclo a el periodo de todo el ciclo, en nuestro caso es

$$\varphi = \frac{118^\circ}{360^\circ} \approx .328$$

-(1.19)

o sea, 32.8% que de hecho es una medida de la transmitancia del modulador. Además, la frecuencia de giro del disco es de 15 Hz que le proporciona un motor de dc para tener una frecuencia de modulación de 30 Hz. Las rendijas del espectrómetro juegan un papel determinante en la calidad de los flujos espectrales a medir. Las quijadas de las rendijas se construyeron cuidadosamente. La rendija de entrada consiste en dos placas de vidrio (portamuestra de microscopio) con orillas afiladas y encontradas con una abertura de .3 y largo 5mm. Las rendijas de salida que se encuentran en el modulador mecánico también están afiladas sus orillas a todo lo largo de la rendija con las tolerancias que se listan en la Tabla 7 y que se muestran en la Fig. 5. En todos los casos se tuvo cuidado de que las orillas de las rendijas quedaran paralelas entre sí, manteniendo una abertura constante. Existen sistemas monocromadores que varían su abertura ajustándolas con un mecanismo micrométrico.

La rendija de entrada sirve como la fuente de radiación; su imagen es enfocada sobre la superficie del chopper que contiene las rendijas de salida. Si la fuente de radiación consiste de algunas longitudes de onda discretas, una serie de imágenes aparecen en esta superficie como líneas oscuras y/o brillantes con respecto al continuo, cada una corresponde a una longitud de onda dada dependiendo si son líneas de absorción o de emisión respectivamente. Una línea en particular puede ser puesta en foco en la rendija de salida (1) al rotar el sistema que contiene a las rejillas de difracción; la imagen de la rendija de entrada en teoría llena a la rendija de salida. La Fig. 4 ilustra la situación en donde la radiación monocromática de longitud de onda λ_2 incide en la rendija de salida, centrada por el espectrómetro - monocromador. Un movimiento en una u otra dirección del sistema de rotación de rejillas sacará de la rendija (1) a la línea espectral λ_2 de interés y centra el continuo λ_1 , (azul) o λ_3 (rojo) cercano a las alas de la línea λ_2 . De esta forma se medirá el flujo de radiación que corresponda al continuo.

El ángulo de rotación de la rendija de difracción contra la longitud de onda λ y dispersión lineal D para las rejillas con las que cuenta el espectrofotómetro, se muestran en las Tablas 3 y 5. En ellas también aparecen las longitudes de onda para los órdenes, $m=1, 2$ y 3 y los ángulos y correspondientes. Con una incertidumbre típica para el ángulo θ de $30''$ que equivalen aproximadamente a una $\Delta\lambda$ de 4\AA .

Por otro lado la generación de la imagen de la rendija, esto es la forma de la curva registrada cuando la rendija es iluminada por una fuente monocromática es

triangular, Fig. 4. Sin tomar en cuenta los efectos de difracción. Esta aproximación es válida siempre y cuando los anchos angulares de las rendijas satisfagan la condición $R/R_0 \ll 1/2$, donde R esta dado por la Ec. (1.14) y R_0 es el poder de resolución teórico (de Rayleigh), que es bien conocido para prismas y rejillas de difracción.

En este caso el límite de resolución del espectrómetro, esta dado por la mitad de la base del triángulo $\delta\lambda$, o sea $\delta\lambda = \eta/d\beta/d\lambda$. Donde η esta dado por la Ec. (1.3).

El flujo Φ máximo, que pasa a través de la rendija de salida, corresponde al ápice del triángulo y está dada por las ecuaciones (1.18a y 1.18b) divididas por R , (Jacquinot 1954):

$$\Phi = \frac{K d_{\text{ent}} \tau \psi' A \lambda}{R} \frac{d\beta}{d\lambda} \quad (1.20)$$

Esta fórmula muestra que para radiación monocromática el flujo de salida es inversamente proporcional a la potencia resolutora usada. La Ec. (1.20) es verdadera solamente si recordamos que la potencia resolutora es menor que un tercio de la máxima potencia resolutora.

En la Fig. 4 se muestra la iluminación monocromática λ_2 incidiendo sobre la rendija de abertura dada y bajo la gráfica de la potencia radiada limitada en función de la posición de espectro. Hay que hacer notar que el "ancho de banda" se define como el intervalo entre dos valores límites de la posición del monocromador (en unidades de longitud de onda) necesarias para mover la imagen de la rendija de entrada a través de la rendija de salida. Si se tiene radiación policromática también representa el intervalo de longitudes de onda emitidas por la rendija de salida para una posición de monocromador.

El ancho de banda efectivo se define como la mitad de la banda de longitud de onda transmitido por el instrumento. El ancho de banda efectivo de un espectrómetro - monocromador depende de la dispersión del prisma o rejillas así como de sus rendijas de entrada y salida. Cuando se tienen rendijas muy angostas la resolución para líneas espectrales de absorción mejora pero se pierde flujo luminoso (potencia radiante) emitido, dificultando una medición precisa de esta potencia. Por consiguiente rendijas más abiertas son usadas en el espectrofotómetro para tener un mayor flujo luminoso y poder tener una mejor medición cuantitativa de la línea espectral, en lugar de buscar un detalle cualitativo de ella, que es lo que se busca es espectrofotometría estelar. En nuestro caso interesa comparar los flujos de ciertas líneas espectrales y del continuo cercano y obtener el cociente de continuo a la línea (c/l).

Las líneas espectrales seleccionadas son de absorción y varían en su ancho desde unos 10 a 40 Å/mm como son los casos de líneas de Helio I (λ 5876) y la primera línea de Balmer del Hidrógeno H α (λ 6563) para estrellas de tipo espectral O, B y A.

Las características de las rendijas y rejillas se encuentran ampliamente listadas en las Tablas y únicamente nos resta decir que las rendijas construidas en el modulador mecánico (chopper) para permitir el paso del flujo luminoso tienen el ancho equivalente de las líneas espectrales, de Estrellas Tempranas de secuencia principal.

1.7 Trayectoria de Radiación Luminosa en el Espectrofotómetro.

El espectrofotómetro utiliza un número mínimo de elementos ópticos por los cuales pasará la radiación luminosa, ver Fig. 2. El haz de luz del objeto estelar (estrella, galaxia, etc.), a observar por el telescopio, proviene del espejo secundario de éste, incidiendo y haciendo foco sobre la rendija rectangular de entrada. Esta rendija tiene .3mm de apertura x 5mm de largo permitiendo que objetos de hasta $4.13''$ de diámetro pasen a través de ella sin reflejar luz. Como los espejos que forman a la rendija están inclinados 5° con la horizontal, esto nos permite reflejar el campo del objeto observado a un primer periscopio llamado de "campo" que tiene un sistema de lentes y ocular Erfle gran angular. Este periscopio de campo permite elegir y centrar sobre la rendija el objeto estelar de interés.

El haz del objeto que hizo foco en la rendija pasa entre ella y se abre en la misma relación $f/15$ con la que incidió, hacia el colimador. En la parte inferior de la rendija de entrada tenemos un pequeño espejo plano inclinado 45° que tiene dos posiciones controladas desde el exterior del instrumento por medio de una varilla con perilla. Cuando la varilla está hacia adentro el espejo que está colocado al extremo de ella, intercepta el haz luminoso que proviene de la rendija de entrada, desviándolo hacia un segundo periscopio compuesto de lentes y ocular Kellner. En esta posición del espejito permite ver si el objeto de interés es el que efectivamente está pasando entre la rendija. Comprobado lo anterior se puede retirar el espejito al jalar la varilla, posición dos, permitiendo al haz continuar su trayectoria, para inmediatamente ser interceptado por el disco que sujeta a los filtros, hasta cinco en forma individual, los cuales restringen el intervalo espectral y eliminan órdenes superpuestos en las líneas espectrales de interés. La posición del filtro a usar se puede escoger desde el exterior del instrumento haciendo girar el disco observando a través de una pequeña ventana el indicador del filtro posicionado.

Los tres filtros con los que actualmente cuenta el instrumento son Corning: 1-75 (transparentes), 3-66 (rojo) y 3-71 (amarillo). Las curvas de transmitancia contra longitud de onda se muestran en la Fig. 6.

El colimador es un paraboloide fuera de eje de distancia focal 644mm y diámetro 63.5mm montado en un dispositivo mecánico que permite ser enfocado y rotado cuando se está alineando el sistema óptico o se está cambiando la relación focal. El cono de luz que incide sobre el colimador se refleja colimado (un haz de radio constante) hasta incidir sobre la rejilla de difracción, que está montada sobre un mecanismo rotatorio que permite escoger, el intervalo y orden espectral que se desee estudiar en la rejilla o escoger una segunda rejilla, el haz sale con una dispersión angular dada por las características de las rejillas. Ver Tabla 2. Este haz incide sobre una tercera superficie óptica aluminizada que es la cámara, otro paraboloide fuera de eje con relación focal $f/7$, distancia focal 322mm y diámetro 63.5mm. Este haz hace foco en las rendijas de salida que son aberturas de ~ 1 mm hecha sobre el modulador mecánico, esto permite observar alternadamente la línea espectral y su continuo o algún otro detalle de interés del espectro.

Después de que el haz luminoso pasa a través de las rendijas, se dirige a la lente de Fabry del sistema de detección, el haz es enfocado sobre el fotocátodo del detector (fotomultiplicador 1P21 o fotodiodo de silicio SND-140). La lente de campo está montada en un cilindro roscado de teflón que permite ser girado para enfocar la luz sobre la parte sensible del detector. El sistema de lente de campo y detector forma parte de una caja refrigerante que los contiene, el primero viendo al exterior y el segundo encapsulado herméticamente. Esta caja fría a su vez contiene conectores BNC para cable coaxial para la alimentación de voltaje y la salida de la señal. Todo el conjunto está forrado de material aislante y cubierta de lámina de aluminio. La caja refrigerante tiene en la pared anterior una espada que le sirve de obturador de luz para permitir la medición de corriente oscura. El sistema de caja fría se sujeta por medio de una placa aislante al instrumento haciendo coincidir exactamente la posición de lente de la Fabry con el barreno que tiene el instrumento y por donde sale la luz que proviene del chopper. De ésta forma queda alineado y enfocado para proceder a medir el flujo de radiación.

CAPITULO II

SISTEMA DE DETECCION Y AMPLIFICACION

2.1 Introducción.

El desarrollo de detectores fotosensibles ha tenido un progreso gradual durante muchos años, particularmente aquellos de interés astronómico. Hasta hace apenas un siglo el ojo humano prácticamente era el único detector astronómico, luego vino la emulsión fotográfica que revolucionó gradualmente a la astronomía. La fotografía no solamente proporcionó un registro permanente de la observación, sino que también fue posible realizar exposiciones de largo tiempo, algo que el ojo humano no puede hacer.

En las últimas décadas el número y variedad de detectores fotosensibles se ha incrementado enormemente. Las celdas fotoeléctricas de uno u otro tipo se usan actualmente profusamente en las observaciones hechas con telescopios ópticos.

También existen fotodetectores para un propósito especial como son los acopladores térmicos, las celdas de Golay, las cámaras de fotoionización, y las memorias de fósforo termoluminiscentes. Los intensificadores de imagen fotoeléctricos han sido en los últimos años de gran interés para la astronomía.

Una comparación que es útil de los detectores astronómicos que incluyen al ojo humano, la emulsión fotográfica, fotoemisores y fotoconductores, es la que se puede hacer de estos con un detector ideal. Un detector perfecto será aquel que permita que cada fotón emitido pueda ser colectado y registrado. En general y con la nueva tecnología los detectores se están acercando a esta situación ideal.

La incidencia de fotones al azar a la superficie de un detector es de dos tipos. Los fotones en general están uniformemente espaciados en el tiempo de arribo a la superficie del detector o al punto de impacto. Excepto por el pequeño número asociado a la estadística de Bose - Einstein, cada fotón es independiente de cada uno de los otros. Podemos imaginar una superficie "uniformemente" iluminada como un mosaico de pequeñas áreas iguales, algunos de estos elementos de área durante una exposición recibirán accidentalmente más fotones que el promedio mientras que otros recibirán menos que el promedio.

De las reglas de la estadística podemos saber cuanta dispersión en el número de fotones incidentes por unidad de área se tendrá; análogamente con respecto a una secuencia de exposiciones de igual duración, también se tendrá una dispersión en el número de fotones incidentes por unidad de área. En otras palabras, la llegada de fotones, está caracterizada por ruido espacial y temporal.

Un detector en general siempre tendrá un nivel de ruido mayor que el inherente al haz de fotones incidente. En una primera aproximación se puede conocer el umbral de detección en función de la eficiencia cuántica detectable diciendo que el ruido observado de un detector es igual a $1/\sqrt{Qn\tau}$. Donde n es el promedio de fotones que inciden por segundo, τ el tiempo de exposición y Q la eficiencia cuántica detectable. Para algunos detectores cuyas respuestas están caracterizadas por distintos fotoeventos, la eficiencia cuántica detectable Q es aproximadamente la misma que la razón del número de fotoeventos a el número de fotones incidentes. En una emulsión fotográfica esto sería el número de granos ennegrecidos dividido por el número de fotones incidentes. Se puede generalizar, que cuando los fotoeventos no son todos del mismo tamaño, la razón de fotoevento a fotón será mayor que la verdadera eficiencia cuántica detectable. Análogamente, el comportamiento de un detector puede ser descrito por la potencia equivalente de ruido (NEP). Esta potencia es la cantidad de radiación de entrada que producirá una señal igual en tamaño al ruido rms.

La mínima señal astronómica observable, es decir el umbral detectable que se puede alcanzar con un detector particular no necesariamente está determinada por las características del propio detector. En fotometría fotoeléctrica y con un telescopio pequeño (<1 metro) la amplitud de modulación de la luz de una estrella por la atmósfera terrestre es con frecuencia fuente de ruido. Adicionalmente de que las observaciones de preferencia deben de hacerse con cielo despejado de nubes y fondo oscuro (sin Luna) y con un buen "seeing".

Los umbrales astronómicos que se pueden alcanzar han sido discutidos por Baum (1962) en términos de la eficiencia cuántica detectable Q y otros parámetros de los instrumentos a usar. Para ésta situación existen tres casos de interés: (a) la detección de estrellas débiles con un cielo nocturno de fondo, (b) la detección de imágenes difusas como nebulosas y galaxias, y (c) la detección de espectros. En estos tres casos el umbral de detección puede ser calculado cuantitativamente; éstos cálculos teóricos pueden ser comparados con el umbral observacional que se obtenga en la práctica.

2.2 Cátodos Fotoemisivos.

El término "fotoemisor" se refiere al proceso básico llamado "efecto fotoeléctrico", en donde los fotones son absorbidos por el material

fotosensitivo del fotocátodo y son emitidos electrones de la superficie del fotocátodo. Existen tres clases de este tipo de detectores y son: foto-tubo al vacío, foto-tubo con gas y los fotomultiplicadores. Los efectos fotoemisivos ocurren en cierto tipo de conductores o metales y en semiconductores; en estos materiales, los fotones incidentes, que no son reflejados en la superficie, penetran hasta cierta profundidad en el material, donde son absorbidos. Cada fotón trae una energía que está descrita por la ecuación de Planck:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad -(2.1)$$

donde $h=6.623 \times 10^{-34}$ WS⁻² es la constante de Planck, ν la frecuencia de la radiación, c la velocidad de la radiación electromagnética (2.998×10^8 ms⁻¹), y λ la longitud de onda de la radiación. Para darnos una idea de esto: el ojo humano puede detectar un flujo de aproximadamente 10 fotones por segundo a la longitud de onda de 550 nm; de acuerdo a la ecuación (2.1), y haciendo una integración en un segundo, esto corresponde a una potencia de radiación de 3.61×10^{-18} W).

El electrón que absorba esta energía adquiere una energía cinética y se mueve hacia la superficie del material. En la superficie metálica existe un potencial de retención conocido como "función de trabajo" E_w . En los semiconductores este potencial tiene dos componentes: la afinidad electrónica E_a , que es un potencial de superficie, y una parte de energía E_g de la banda prohibida, tal que para semiconductores $E_w = E_a + E_g$.

En los dos tipos de materiales el electrón es emitido de la superficie si su energía cinética es mayor que el potencial de retención E_w , esto es, si

$$h\nu \geq E_w \quad -(2.2)$$

Sin embargo, no todos los electrones con esa energía cinética son emitidos de la superficie. Algunos son diseminados y atrapados dentro del material tal que su eficiencia cuántica (esto es, el cociente del número de electrones emitidos al número de fotones absorbidos) es bastante menor que 1. La pequeña fracción de electrones emitidos es acelerada por un voltaje de polarización hacia otro electrodo, el cual puede ser el ánodo o un dinodo que genere electrones secundarios, como es el caso del fotomultiplicador.

Todos los detectores fotoemisivos necesitan un voltaje de polarización para llevar a los electrones desde el fotocátodo hasta otro electrodo. Estos voltajes pueden variar desde 1 volt hasta varios kilovolts en el caso de fototubos al vacío. Por consiguiente la estabilidad de la fuente de poder es particularmente importante para fotomultiplicadores porque su ganancia depende fuertemente del

voltaje de polarización. Más adelante se dan detalles para nuestro arreglo fotométrico.

La ecuación (2.2) o su correspondiente $\frac{hc}{\lambda} \geq E_w$ determina la máxima longitud de onda

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{E_w} \quad -(2.3a)$$

para el intervalo de respuesta espectral. Sustituyendo los valores de h y c en la ecuación anterior, se tiene

$$\lambda_{\max} = 1.2398/E_w, [\mu\text{m}] \quad -(2.3b)$$

donde λ está en micrómetros si E_w está dada en volts. La fotocorriente para un cátodo fotoemisor está dado por

$$I = (1 - \rho) Q q \Phi \lambda / hc \quad -(2.4)$$

donde ρ es la reflectancia de superficie anterior, $(1 - \rho)\Phi$ representa el flujo absorbido; Q es la eficiencia cuántica del número de fotoelectrones emitidos por fotón incidente; Φ es el flujo incidente; y $\frac{\lambda}{hc}$ convierte el flujo absorbido al número de fotones absorbidos; q es la carga del electrón.

Los fotocátodos para detectores fotoemisivos se han hecho de metales puros y de materiales semiconductores. Abundante información sobre esto puede encontrarse en Sommer (1968) o en el "CRC Handbook of Chemistry and Physics" Weast (1979 - 1980).

La diferencia básica entre un fotoemisor metálico y un semiconductor es que la eficiencia cuántica en el primero es del orden del 0.1%, mientras que para fotoemisores de semiconductor la eficiencia cuántica es del orden del 30%. En semiconductores de juntura (fotodiodos de fotoefecto interno), la eficiencia cuántica se aproxima al 100%. Por consiguiente semiconductores fotoemisivos como Cs-Sb, Cs-O-Ag y Ga-As son materiales muy usados en el intervalo del visible.

La clasificación de la Asociación de Industrias Electrónicas (EIA) para detectores fotoemisivos está dada por los llamados números S. Algunos detalles de las funciones de responsividad se muestran en la lista siguiente, en donde varios números se usan para detectores fotoemisivos. El número S especifica la distribución de responsividad espectral para todo el detector en donde se toma en cuenta la transmitancia espectral de la cápsula (tubo de vidrio).

Adicionalmente se tiene que los procesos de fotoemisión esencialmente se caracterizan por su linealidad en un gran intervalo de intensidades, desde cero hasta un nivel de saturación, comportamiento que no se presenta con detectores como el ojo humano y placa fotográfica.

Números S para Detectores Estandarizados por la E.I.A.

Número S	Material Fotosensitivo	Material de la Cápsula	Tipo de Detector
S-1	Ag-O-Cs	Lime glass	Fotoemisor
S-2	Obsoleto		
S-3	Ag-O-Rb	Lime glass	Fotoemisor
S-4	Cs-Sb	Lime glass	Fotoemisor

2.3 Aplicaciones en la Fotometría Astronómica.

Las eficiencias cuánticas de dos de los principales fotocátodos emisores usados en astronomía se muestran en la Fig. 7. El cátodo de antimoniuro de cesio que tiene un pico en la respuesta alrededor de 4000 \AA es uno de los más usados en fotometría estelar. En algunos tubos fotomultiplicadores como el bien conocido RCA-1P21, la luz es incidente en la misma cara del cátodo de donde son colectados los electrones disparados, pero en otros tubos la luz es incidente en una cara de un cátodo semitransparente y los electrones disparados son colectados en una cara opuesta. Se espera que en un buen cátodo de antimoniuro de cesio se tenga un pico de eficiencia cuántica de aproximadamente el 12% y una "sensitividad luminosa" de aproximadamente $50 \mu\text{A/lumen}$ para una fuente de luz incandescente estandar de 2870° K . Han sido reportadas eficiencias hasta de un 20%. Johnson (1979). El fotocátodo de óxido de cesio-plata Cs-O-Ag da una sensibilidad en los intervalos del rojo y cercano infrarrojo del espectro, pero con una menor eficiencia cuántica que el fotocátodo anterior. A temperatura ambiente, la corriente oscura de un fotocátodo de óxido de berilio (RCA-C31004A) u óxido de cesio-plata (RCA-7102) tiende a ser mucho más alta que el de fotocátodo de antimoniuro de cesio, sin embargo el enfriarlo tiene un mayor efecto sobre este último. A la temperatura de hielo seco (-75° C), estos dos fotocátodos pueden tener niveles similares de corriente oscura.

La respuesta al calor y sensibilidad de tubos emisivos no es independiente de la temperatura. Young (1963) ha organizado información y discute los efectos de la

temperatura en términos de la fotometría astronómica. Para fotocátodos de antimonio de cesio, la respuesta es más alta a temperatura de hielo seco que a temperatura ambiente, pero decae a temperatura de nitrógeno líquido (-125°C). Al enfriar los cátodos de antimonio de cesio son menos sensibles al rojo que cuando están sin enfriar, que no es el caso de los cátodos de óxido de cesio-plata. En los tubos fotomultiplicadores la temperatura no solo afecta a los cátodos sino también a la multiplicación en los dinodos. Una posible causa de este último efecto se puede deber a flexiones térmicas del arreglo de los dinodos, aunque también campos magnéticos y efectos gravitacionales producen efectos observables.

Los materiales de los cátodos como el antimonio de cesio tienen una sensibilidad que se extiende hasta el ultravioleta, pero como los fototubos están encapsulados en vidrio esto excluye parte del espectro ultravioleta por abajo de los 3000 Å. Dunkelmann, Fowler y Hennes (1962) describen tubos de antimonio de cesio con ventanas de cuarzo fundido y fluorita de calcio (Corning 9741), así como otros materiales, que transmiten radiación ultravioleta en el intervalo de 1000 a 3000 Å.

2.4 Tubos Fotomultiplicadores.

Un detector fotosensitivo ampliamente usado en la astronomía hoy en día es el tubo fotomultiplicador, en especial en nuestro sistema espectrofotométrico se usa el RCA-1P21 que tiene un fotocátodo S-4. Los tubos fotomultiplicadores son detectores con cátodo fotoemisor, un sistema de dinodos en donde efectos de emisión secundaria dan una amplificación de corriente, y un ánodo que colecta a los electrones del sistema de dinodos, dando una salida en la forma de corriente de ánodo. El rasgo característico es el sistema de dinodos, que consiste de electrodos cubiertos con materiales especiales que manifiestan emisión secundaria. El número de electrones secundarios por electrón primario incidente depende de la energía cinética de este último. En los fotomultiplicadores el número de dinodos varía de 5 a 16 y cada uno contribuye con una ganancia de 3 a 6, la ganancia total puede llegar a ser de 10^7 o más. En otras palabras si \bar{S} es el promedio de electrones secundarios y N el número de dinodos, entonces la amplificación total entre el cátodo y ánodo está dado por

$$G \sim \bar{S}^N$$

-(2.5)

Los fotomultiplicadores son, ahora los detectores más sensitivos contando con una gran área sensitiva, permitiendo ser usados como contadores de fotones hasta de 100 fotones por segundo, que corresponde a un flujo de $3.6 \times 10^{-17} \text{ W}$ a 550 nm, siendo un orden de magnitud de detección mayor que el ojo humano.

Un diagrama esquemático sencillo de un fotomultiplicador y su divisor de voltaje para proporcionar a los dinodos el voltaje necesario de aceleración se muestra en la Fig. 8, donde la radiación incide en el fotocátodo, que emite fotoelectrones. El voltaje V_1 a través de la resistencia R_1 acelera a los fotoelectrones hacia el primer dinodo D_1 , donde ocurre emisión secundaria. Los electrones emitidos en D_1 son acelerados hacia el dinodo D_2 por medio de la caída de voltaje V_2 a través de R_2 . Este proceso es repetido hasta que los electrones desde el último dinodo, para nuestro caso D_9 , sean colectados por el ánodo, donde aparecen como una corriente de salida, que puede ser medida como un voltaje a través de una resistencia de carga R_L o por técnicas de conversión de voltaje a corriente usando un amplificador operacional. Los voltajes de aceleración entre dos dinodos sucesivos son del orden de 50 - 100V, el total que se necesita va de 500 - 1500 V. El crecimiento del coeficiente de la emisión secundaria contra voltaje de dinodos se muestra en la Fig. 9.

El problema típico en fotometría es el de detectar y medir estrellas débiles en contra de la radiación de fondo que proviene de un cielo nocturno. Si F representa el número de pulsos por segundo de los fotoelectrones debido al cielo, mientras que O es el número de pulsos oscuros por segundo, se puede demostrar que la razón de información relativa para detectar una estrella débil superpuesta F y O está dada por la expresión $F^2/(F+O)$. Baum (1962) muestra el comportamiento relativo para el caso del fotomultiplicador 1P21 trabajando contra tres niveles de fondo del cielo. Para cada nivel de fondo la medida de la información crece desde cero en unidades de discriminación (distribución de la altura de los pulsos), pasa por un máximo, y cae de nuevo para grandes valores de la altura de los pulsos. Cuando hay una gran cantidad de radiación del cielo, la discriminación óptima ocurre en los pulsos más pequeños; esto es, casi todos los pulsos de los fotoelectrones pueden ser usados. Cuando la cantidad de radiación de fondo del cielo es relativamente pequeña, la discriminación máxima ocurre en los pulsos de gran tamaño, debido a que la emisión oscura juega un papel importante. Este tipo de consideraciones es necesario tomarlas en cuenta al usar fotomultiplicadores para medir características de espectros o en otras aplicaciones astronómicas. Una discusión amplia sobre los límites observacionales que tienen los fotómetros fotoeléctricos astronómicos fue dada por Johnson (1947) y particulariza para el uso de fotomultiplicadores 1P21.

2.5 El Fotomultiplicador RCA-1P21.

El elemento sensible a la luz en un sistema fotométrico es una celda fotoeléctrica de algún tipo, en el intervalo de longitudes de onda de 3000 a 11000 Å, conocido actualmente como fotomultiplicador. El primer fotomultiplica-

dor usado en fotometría fotoeléctrica astronómica fue el RCA-1P21 (en su versión más económica, RCA-931A), y sigue siendo uno de los más sensibles de 3000 a 6500 Å. Debido a que su cátodo está localizado en el centro de un tubo, es en ocasiones complicado llevar la luz hasta el cátodo cuando se tienen sistemas ópticos con relaciones focales $\leq f/3$. Sin embargo su gran sensibilidad y gran respuesta del 1P21, lo hacen un detector muy usado en astronomía. Fotomultiplicadores 1P21 seleccionados se pueden obtener del fabricante, garantizando cátodos sensitivos que excedan los 80 $\mu\text{A/lumen}$ y con corrientes oscuras menores que un electrón térmico/segundo al ser enfriado el tubo. La experiencia y literatura han mostrado que al ser enfriado el fotomultiplicador a temperatura de hielo seco (-75°C), su corriente oscura disminuye considerablemente. Solamente en el 1P21 la eficiencia de colectar los fotoelectrones al dinodo es de aproximadamente el 100%, en otros tubos esta eficiencia está alrededor del 80%. Es importante tomar en cuenta que además de tener un cátodo muy sensitivo debe estar acompañado de un sistema de colección eficiente. En el Apéndice B se muestran las principales características del fotomultiplicador RCA-1P21. El 1P21 ha sido comparado con otros tubos fotomultiplicadores que colectan los fotoelectrones en el primer cilindro por medio de un tipo de lente electrónico, mientras que en el 1P21 los fotoelectrones son generados dentro de la estructura de varios dinodos y este tipo de estructura conocida como de "trampa" lo hacen superior. Para el intervalo de longitudes de onda de los 6000 a 11000 Å es necesario un fotocátodo diferente al del RCA 1P21(SbCs). Existe la superficie fotoemisiva S-1(Cs-OAg) (sensitividad de 20 $\mu\text{A/lumen}$) para todo el espectro; ésta puede ser conseguida para varias fotomultiplicaciones comerciales. Sin embargo, su eficiencia cuántica es baja, por consiguiente en este intervalo es recomendable utilizar un fotodiodo de silicio (Si).

En estos sistemas de detección fotométrica, es conveniente enfriar el detector, en este caso el fotomultiplicador. Esto es con el propósito de producir condiciones de temperatura constante, independiente de las fluctuaciones de temperaturas externas. Por consiguiente una buena caja refrigerante ("fría") que almacena al detector, la óptica que le acompaña y el material refrigerante (hielo seco o nitrógeno líquido) deben ser parte del sistema fotométrico. Una descripción detallada de la configuración de las cajas frías para el fotomultiplicador RCA-1P21 y el fotodiodo de silicio SND-130 de EG-G se encuentra en Ortega (1982). Estas cajas frías son adosadas al cuerpo principal del espectrómetro según se muestra en la Fig. 2.

2.6 Responsividad.

La responsividad de los fotomultiplicadores se acostumbra darla como responsividad luminosa (amperes por lumen) o como responsividad espectral para la longitud de onda del máximo de la función $s(\lambda)$, llamada " λ pico" o λ_p .

Una combinación de $S(\lambda_p)$ y la función $s(\lambda)$ da información inmediata del comportamiento espectral para el intervalo total de longitud de onda, mientras que la responsividad luminosa da información conveniente para la medición fotométrica; pero la información sobre el comportamiento fuera del intervalo del visible solamente se puede obtener en términos de la función $s(\lambda)$ y una deconvolución, eliminando la función $V(\lambda)$.

La responsividad de los fotomultiplicadores está especificada por el cátodo y el ánodo. La corriente de cátodo I_c debido al flujo radiante incidente y monocromático $\Phi(\lambda)$ está dado por

$$I_c = S_c(\lambda) \Phi(\lambda) \quad -(2.6)$$

donde $S_c(\lambda)$ es la responsividad espectral del cátodo. No todos los electrones que dejan el fotocátodo llegan al primer dinodo D_1 . Si ϵ_0 es la eficiencia de colección de la etapa cátodo- D_1 (con $0 \leq \epsilon_0 \leq 1$), la corriente que llega al primer dinodo es $I_c \epsilon_0$, donde es amplificada debido a la emisión secundaria por un factor δ_1 . Suponiendo una eficiencia de colección ϵ_1 entre el primer y segundo dinodo y así sucesivamente, la corriente de ánodo I_a está dada por

$$I_a = \Phi(\lambda) S_c(\lambda) \epsilon_0 (\delta_1 \epsilon_1 \delta_2 \epsilon_2 \cdots \delta_N \epsilon_N) \quad -(2.7)$$

si $\delta_1 = \delta_2 = \cdots = \delta_N$ y $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \cdots = \epsilon_N$
entonces se tiene

$$I_a = \Phi(\lambda) S_c(\lambda) \epsilon_0 (\delta \epsilon)^N \quad -(2.8)$$

Esto da la responsividad del ánodo

$$S_a(\lambda) = \frac{I_a}{\Phi(\lambda)} = S_c(\lambda) \epsilon_0 (\delta \epsilon)^N \quad -(2.9)$$

donde el término $\epsilon_0 (\delta \epsilon)^N$ es conocido como la ganancia.

Considerando valores acostumbrados de los voltajes V_i entre los dinodos, el coeficiente de emisión secundaria δ_i está relacionado con V_i por (Budde 1983):

$$\delta_i = c V_i^{0.7} \quad -(2.10)$$

donde c es una constante de proporcionalidad. La ganancia total G de la estructura de dinodos está dada por

$$G = C V_i^{0.7N} \quad -(2.11)$$

y el cambio relativo de G como función del cambio de V es

$$\frac{dG}{G} = 0.7N \frac{dV_i}{V_i} \quad -(2.12)$$

si $N=9$, esto es

$$\frac{dG}{G} = 6.3 \frac{dV_i}{V_i} \quad -(2.13)$$

El voltaje interdinodo está linealmente relacionado al voltaje a través de la cadena de divisor de voltaje, por consiguiente la ec. (2.13) es válida para todo el voltaje. Esta ecuación nos pide que la estabilidad de la fuente de poder sea mejor por un factor de ~ 10 la precisión esperada en la medición, por consiguiente, una consideración importante para el buen funcionamiento del fotomultiplicador es la estabilidad de la fuente de voltaje.

2.7 Ruido en los Fotomultiplicadores.

Cualquier sistema eléctrico tiene ruido, esto es, una señal de salida que varía en forma azarosa y que no está relacionada con la señal de entrada. En los fotomultiplicadores existen varias fuentes de ruido.

Corriente oscura. Aunque no este llegando radiación a la superficie del fotocátodo, la emisión termoiónica produce una corriente "oscura", que muy a menudo constituye la fuente principal de ruido en dispositivos fotoemisivos. La corriente de emisión termoiónica I_T para un cátodo de temperatura T de área A y una función de trabajo E_w está dado por la ecuación de Richardson-Dushman.

$$I_T = a A T^2 \exp\left(\frac{-q E_w}{kT}\right) \quad -(2.14)$$

aquí a es una constante que para metales puros tiene el valor de $1.2 \times 10^6 \text{ Am}^{-2} \text{ K}^{-2}$. De la expresión anterior se ve claramente que la emisión termoiónica puede ser reducida al disminuir la temperatura, aunque otras fuentes de ruido pueden ser dominantes a bajas temperaturas (por ejemplo los electrones pueden ser emitidos del fotocátodo por bombardeo radioactivo). Si la corriente oscura fuera absolutamente constante, sería entonces muy sencillo restarla de la señal total de salida; sin embargo, ésta, está sujeta a fluctuaciones azarosas debido a la naturaleza estadística de la emisión termoiónica.

Ruido de Disparo. El ruido de disparo (conocido como ruido shot) se encuentra donde haya un flujo de corriente y viene directamente de la naturaleza discreta de la carga electrónica. Por consiguiente cuando una corriente fluye y pasa por

cualquier punto en un circuito, la llegada de electrones fluctuará ligeramente (distribución estadística) y por consiguiente da una fluctuación en el flujo de la corriente en ese punto. Pierce (1956) demostró que la magnitud rms de las fluctuaciones de corriente ΔI , entre las frecuencias f y $f + \Delta f$ esta dada por:

$$\overline{\Delta I_f^2} = 2 i q \Delta f \quad - (2.15)$$

en el tiempo de observación $\tau_o = \frac{1}{2\Delta f}$, y donde i es la corriente que fluye, que para el caso de fotomultiplicador es la suma de la corriente oscura y la corriente de la señal que deja el fotocátodo.

La existencia de la corriente oscura producida por el ruido de disparo pone un límite al umbral de señal detectable. Si tenemos una señal eléctrica como resultado de una señal óptica que sea menor que la señal de ruido entonces no podremos detectarla sin tomar en cuenta la relación de señal a ruido. Si definimos la responsividad $S(\lambda)$ del fotomultiplicador como i/Φ donde Φ es la potencia radiante incidiendo en el fotocátodo, entonces la potencia de señal detectable mínima en presencia de corriente oscura termoiónica I_T , esta dada por:

$$\Phi_{\min} = \frac{(2 I_T q \Delta f)^{1/2}}{S(\lambda)}, \quad [\text{Watts}] \quad - (2.16)$$

Ruido de Johnson (o Nyquist). El ruido de Johnson viene de la agitación térmica de las cargas portadoras en el conductor; su naturaleza azarosa resulta en una fluctuación en el voltaje que aparece en el conductor. El valor rms de este voltaje que tienen componentes de frecuencia que fluctúan entre f y $f + \Delta f$ a través de una resistencia R a una temperatura T esta deducida por King (1966) y esta dada por:

$$\overline{I_f^2} = \frac{4 k T R \Delta f}{R^2} \quad - (2.17)$$

En el fotomultiplicador este ruido aparecerá a través de la resistencia de carga R_L del ánodo. En la práctica este ruido es menor que la corriente oscura y el ruido de disparo.

Con el ruido de disparo I_{cs} de la corriente de cátodo y la emisión "oscura" I_{co} del cátodo, la razón de señal a ruido puede ser escrita como

$$\frac{S}{R} = \frac{I_a}{I_{cs}} = \frac{I_c}{[2 q \Delta f (I_c + I_{co}) \delta / (\delta - 1)]^{1/2}} \quad - (2.18)$$

donde I_a es la señal de corriente del ánodo y I_{cs} es la corriente de ánodo de disparo. De la ecuación anterior se sugieren varios métodos para mejorar la razón de S/R

1. Reducir la corriente oscura I_{co} (emisión termoiónica del cátodo) al enfriar el fotomultiplicador a temperatura menor que 0° .
2. Reducir I_{co} por la técnica de enfocamiento, que reduce el área activa del cátodo, ya que I_{co} es proporcional al área de cátodo. En estos casos es conveniente seleccionar a los fotomultiplicadores de menor cátodo.
3. Aumentar la emisión secundaria, particularmente en la primera etapa, al aumentar el alto voltaje de esa etapa.
4. Reduciendo el ancho de banda de sistema de medición. El método más efectivo, que se usa para medir constantes de bajo nivel o radiación que varía lentamente es el de combinar radiación modulada (chopeada) con amplificación electrónica de ancho de banda angosta por técnicas de amplificación de sincronía (lock-in).

Ocasionalmente en el cátodo se encuentra ruido debido al alto voltaje con respecto a tierra y materiales aterrizados que tocan la pared exterior del fototubo. Por consiguiente es recomendable cubrir, excepto la ventana, con pintura opaca conductora conectada al potencial del cátodo. Esto también reduce los efectos de histéresis que también son fuente de ruido.

Algunos catálogos especifican la corriente oscura del ánodo para condición de operación a temperatura ambiente y una ganancia G dada. La potencia equivalente de ruido (NEP) también en ocasiones es dada. Si son conocidas la corriente oscura del ánodo I_{ao} , ganancia G y responsividad S , la corriente de ruido de disparo de la corriente oscura, se sigue de la Ec. 2.15 y el NEP del fotomultiplicador está dado por

$$NEP = \frac{(2qI_{ao}G)^{1/2}}{S(\lambda)} \quad -(2.19)$$

Para el tipo de cátodo S-4 del RCA-1P21 se tiene un $NEP=2.4 \times 10^{-16} W$.

Resumen de Condiciones de Operación de los Fotomultiplicadores

Las siguientes sugerencias de operación son útiles para el caso de los fotomultiplicadores, en particular con el RCA - 1P21 que es con el que cuenta el espectrofotómetro.

1. La corriente de ánodo no debe sobrepasar niveles del orden de $1\mu\text{A}$.
2. La estabilidad de la fuente de alto voltaje debe ser aproximadamente 10 veces la precisión esperada de las medidas.
3. El voltaje cátodo a dinodo D_1 y el voltaje del último dinodo D_n a ánodo debe ser independiente del voltaje total, por ejemplo, usando diodos zener, para mantener un voltaje estable, ya que la función de respuesta espectral depende del voltaje entre el cátodo y el primer dinodo.
4. La amplificación de la corriente de ánodo en términos de un amplificador operacional en el modo de conversión de corriente a voltaje es conveniente midiendo la caída de voltaje a través de una resistencia R_L de alta impedancia.
5. Es conveniente para el tubo tener blindaje magnético.
6. Los fotomultiplicadores deben ser guardados en la oscuridad y aunque no estén conectados a la fuente de voltaje, manejarlos con baja iluminación. Antes de usarlos deben estar en la oscuridad por varias horas con el alto voltaje apagado.
7. Para medir irradiancias muy bajas es conveniente enfriarlos, pero la temperatura no debe ser menor de la necesaria. Los fotocátodos S-1 y S-4 pueden ser enfriados hasta por abajo de -30°C
8. Las diferentes funciones de respuesta espectral para cada tipo de fotomultiplicador se encuentran en los catálogos de los fabricantes con la nomenclatura de cátodos fotoemisivos S.

En el circuito de la Fig. 8 un amplificador operacional, convertidor de voltaje a frecuencia y un contador son sugeridos. La combinación de estos dos últimos componentes es también conocido como "voltímetro integrador digital" y existen contadores comerciales con opciones de medición de voltaje. Al tener tiempos de integración entre 10 - 60 segundos se mejora la razón de señal a ruido (S/R) ya que el ancho de banda se reduce a cerca de 0.1 Hz. La resistencia de retroalimentación R_f es puesta en derivación con un condensador C_f para reducir el ruido (limitar el ancho de banda) y la resistencia de retroalimentación puede ser variada en pasos de 10 para cambiar la ganancia de 1:100. Esta misma electrónica se puede usar para diodos de silicio (Si).

2.8 Detectores Semiconductores

En esta sección se describen a los detectores que tienen en común la propiedad de absorber radiación y producir portadores de corriente eléctrica (electrones y agujeros) que permanecen dentro del detector y que cambian su conductividad o generan un voltaje. Este efecto puede ser agrupado bajo el término "efecto fotoeléctrico intrínseco". Estos detectores consisten de material uniforme o de juntura entre dos materiales diferentes, del primer tipo se tiene a los bolómetros y del segundo a las termopilas. Más aun los detectores de juntura se pueden considerar los que operan como fotovoltáicos y como fotoconductivos. Los fotovoltáicos no son polarizados eléctricamente, generando un voltaje o una corriente que es medida por un dispositivo electrónico, o en forma análoga los fotoconductivos necesitan un voltaje de polarización inversa midiendo el cambio de la resistencia debido a la radiación incidente.

Con respecto a los fotodetectores de juntura podemos dividirlos en dos grupos: fotodiodos p-n, p-i-n y Schottky así como los fotodiodos de avalancha. Nuestro fotodiodo de silicio (Si) es del tipo p-i-n del cual daré la mayor información.

Es conveniente en este punto dar una breve explicación de algunos de los términos que posteriormente serán usados.

Los "semiconductores" son un grupo de materiales entre aislantes y conductores metálicos con resistividad que van desde 10^{-2} a la $10^9 \Omega\text{cm}$. Esta resistividad de los materiales depende fuertemente de la temperatura. Cerca del cero absoluto, los semiconductores se vuelven aisladores. La propiedad importante de estos materiales cristalinos es la habilidad de los átomos en el cristal de liberar electrones de valencia hacia los estados energéticos de conducción, electrones ligeramente amarrados, con tal de que algo de energía sea proporcionada al cristal (por ejemplo: energía radiante o calor). Si se introducen algunas impurezas al material, esta propiedad puede cambiar cuantitativamente.

Material tipo n o donadores: Los átomos de estos materiales tienen un electrón de sobra, que está ligeramente amarrado a la estructura del cristal y por consiguiente contribuye fácilmente a la conducción electrónica negativa. Típicos son el antimonio (Sb), arsénico (As) y fósforo (P).

Materiales tipo p o receptores: Los átomos de estos materiales carecen de un electrón en su estructura cristalina. Estos tienden a atraer electrones, y por consiguiente contribuyen finalmente a la conducción positiva o de agujeros. Materiales típicamente receptores son el aluminio (Al), boro (B), galio (Ga), e indio (In).

Un material intrínseco es puro, sin impurezas (dopado) y con una "conducción intrínseca". Los electrones de estos materiales deben recibir suficiente energía para ser elevados del nivel de energía de valencia, al nivel de energía de conducción. El intervalo o diferencia entre estos dos niveles de energía determina el límite de longitud de onda.

2.9 Fotoconductores.

En los fotoconductores a temperatura ambiente existe un cierto número de electrones de conducción de tal forma que ante un voltaje de polarización una pequeña corriente fluye aunque no incida radiación. La energía de los fotones absorbidos es usada para liberar portadores de carga adicionales ya sea de la banda de valencia en los fotoconductores intrínsecos o de los estados de energía con impurezas en fotoconductores extrínsecos. De este modo la radiación incidente genera carga eléctrica adicionales en movimiento, disminuyendo la resistencia efectiva o sea incrementando la conductividad del material.

Así como en los detectores fotoemisivos, la energía del fotón $E_{ph} = h\nu = hc/\lambda$ debe ser mayor que la energía entre las bandas de valencia y conducción $E_V = E_W$ dada por la Ec. (2.2). Como se explicó con anterioridad esto determina el límite de mayor longitud de onda de la función de responsividad espectral λ_{max} dada a su vez por la Ec. (2.3a).

Dado que los fotones incidentes tienen longitudes de onda $\lambda \leq \lambda_{max}$, la fotocorriente está dada por

$$I_{ph} = G(1 - \rho) Q q \Phi \lambda / hc \quad (2.20)$$

donde G es la ganancia fotoconductiva, ρ la reflectancia de la superficie frontal, Q la eficiencia cuántica, q la carga del electrón (1.602×10^{-19} As), Φ el flujo incidente [W], y $hc = 1.9856 \times 10^{-25}$ Wsm. Esta ecuación es idéntica a la Ec. (2.4) para fotodetectores fotoemisivos excepto por la G . En los fotoconductores el tiempo de vida τ_v de los portadores de carga es mayor que el tiempo de tránsito T_r entre los electrodos. Por consiguiente los nuevos portadores pueden ser generados antes de que los anteriormente generados abandonen el material, esto da un decremento adicional en la resistencia. La ganancia fotoconductiva G (Kruse, 1980) esta dada por:

$$G = \frac{\tau_v}{T_r} \quad (2.21)$$

El tiempo de tránsito T_r es inversamente proporcional al voltaje de polarización, y por consiguiente G es proporcional al voltaje de polarización.

La ganancia fotoconduktiva G tiene valores de 10^3 o más, así que la responsividad de estos detectores en ocasiones es comparable a la de los fotomultiplicadores.

Reescribiendo la Ec. (2.20) se tiene que la responsividad espectral es

$$S(\lambda) = \frac{I_{ph}}{\Phi} = (1-P)GQq\lambda/hc \quad -(2.22)$$

Si Q es independiente de la longitud de onda, la función de responsividad espectral de algunos de estos detectores tiene una forma como se muestra en la Fig. 10. La responsividad crece linealmente con la longitud de onda hasta la longitud de onda máxima determinada por la Ec. (2.3a), de donde decrece rápidamente.

2.10 Ruido y Detectividad de los Fotoconductores.

El ruido en los fotoconductores tiene varios componentes. Nudelman (1962) lista entre otras las siguientes cinco fuentes de ruido más importantes:

1. Ruido térmico o de Johnson, la corriente de ruido está dada por la Ec. (2.17) y para el caso del fotoconductor se tiene

$$\overline{I_1^2} = \frac{4kT \Delta f}{R} \quad -(2.23)$$

donde k es la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta, Δf la medida del ancho de banda, y R la resistencia del detector.

2. Ruido de generación - recombinación ($g-r$) provocado por la naturaleza estadística de la generación de portadores de carga y procesos de recombinación. Se describe como

$$\overline{I_2^2} = \frac{2I^2 R \Delta f}{[N(1 + \omega^2 \tau_v^2)]} \quad -(2.24)$$

3. Ruido $1/f$ o de parpadeo, descrito por

$$\overline{I_3^2} = \frac{C_1 I^2 \Delta f}{f A d} \quad -(2.25)$$

donde C_1 es una constante, I la corriente total, A el área del detector y d el espesor del detector. A este ruido no se le ha encontrado una explicación completamente convincente; parece generarse en la superficie de los metales o en las interfaces de contacto.

4. Ruido de disparo, ver Ec. (2.15), descrita por

$$\overline{I}_4^2 = 2 q I \Delta f$$

-(2.26)

5. Ruido de fondo, que será radiación que proviene de la fuente de luz a observar. En el caso de una estrella, la radiación de fondo será el brillo del cielo debido a la Luna, nubes o polvo suspendido en la atmósfera; también puede provenir de radiación espuria producida en el espectrómetro o al interior de la cúpula (luz de lámparas).

Por otro lado es importante tener en cuenta que la detectividad D^* de un detector esta relacionada con el campo de visión y la temperatura del blindaje en donde se encuentra éste, así debe de contar con una óptica de entrada y estar a la misma temperatura que el detector. Adicionalmente, los filtros ópticos pasabanda nos limitan el intervalo espectral en la longitud de onda deseada, absorbiendo o reflejando las longitudes onda de la radiación fuera de éste intervalo. En el caso del espectrofotómetro se tiene radiación de una línea espectral en una banda angosta de longitudes de onda dadas por las rendijas del modulador mecánico (chopper) pero también podrían ser dadas por filtros de interferencia, para incrementar D^* para esta región (Harris 1976).

Long (1980) describe la corriente de ruido total del fotoconductor en el intervalo Δf por

$$\overline{I}_n^2 = 4 q (q Q \Phi_b A G^2 + q g_{th} G^2 + k T / q R) \Delta f \quad -(2.27)$$

donde q es la carga del electrón, Q la eficiencia cuántica, Φ_b el ruido fotónico de fondo, A el área del elemento fotoconductor, G la ganancia fotoconductoriva, g_{th} la razón de generación térmica, k la constante de Boltzmann, T la temperatura, y R la resistencia.

El primer término representa el ruido generado por el flujo fotónico de fondo y se reduce al disminuir éste o el área de detección. El segundo término representa el ruido la generación-recombinada térmica, que se reduce al enfriar. El tercer término es el ruido de Johnson, que es debido a la resistencia y que también disminuye al enfriarla.

Hay un número de circunstancias y de parámetros de operación donde las fuentes de ruido son importantes y dominan para dar un número grande de la potencia equivalente de ruido (NEP) del detector. Más detalles se encuentran en la literatura con Nudelman (1962), Humprey (1965) y Long (1980). De la Ec. (2.27) y tomando el número de portadores debido al ruido de fondo se puede encontrar una relación frecuentemente usada entre el flujo de fondo Φ_b y la Detectividad D^* :

2.11 El Fotodiodo de Silicio

El fotodiodo de silicio (Si) es un detector de juntura. Puede ser usado en varias aplicaciones de radiometría, fotometría y colorimetría debido a su fortaleza al trabajo, simplicidad de operación, linealidad y bajo precio. En muchas aplicaciones ha competido con los fotomultiplicadores y fotoceldas de vacío, y otros sustitutos.

La propiedad sobresaliente de esta juntura de semiconductor es la juntura rectificadora de dos materiales diferentes. El término "rectificadora" se refiere al efecto del voltaje aplicado en una dirección, hacia adelante, provocando comparativamente grandes corrientes; mientras que el mismo voltaje aplicado en dirección contraria, hacia atrás, se obtienen corrientes mucho menores. Para los fotodiodos de juntura, los dos materiales que forman la juntura están seleccionados, que aun sin voltaje de polarización, se tiene una diferencia de potencial a través de la juntura. Este potencial agota a los portadores de carga en la vecindad aumentando la resistencia. La radiación incidente sobre la juntura genera portadores de carga positivos y negativos, que están separados por el potencial interno y dan origen a una corriente en el circuito externo. De otro modo, si una polarización externa es aplicada, incrementa la conductancia de tal forma que la corriente puede fluir en respuesta a esta polarización.

La región desierta (agotada) en la vecindad de la juntura de los dos materiales en ocasiones tienen portadores de carga, al menos que un alto voltaje de polarización inverso sea aplicado al detector. Si está completamente agotada de cargas esta región, los pares de carga que se generen por la incidencia de radiación se separan y se mueven hacia los electrodos. El ancho de la región desierta se incrementa con la polarización y esto se traduce en la capacitancia y por consiguiente en el tiempo de respuesta.

El material semiconductor más usado para fotodiodos es el silicio. Este tiene una diferencia de energía entre las bandas de 1.14 eV y permite una eficiencia cuántica por arriba del 80% para longitudes de onda entre 0.8-0.9 μm con una responsividad espectral de 0.65 A/W . Un estudio amplio y con resultados experimentales sobre el comportamiento de este tipo de fotodiodos para ser usados en fotómetros fotoeléctricos se encuentra en Chavarria (1977), así como su uso con circuitos de bajo ruido en Ortega (1980) y Fuentes (1985); confirmando ampliamente la gran utilidad que tienen los fotodiodos de silicio para ser usados en equipos de observación astronómica en el intervalo espectral

de 200 - 1100 nm. Adicionalmente se encuentra que los fotodiodos de silicio son mejores para magnitudes estelares intermedias a brillantes (≤ 8 magnitudes) no así para magnitudes débiles donde debe preferirse al fotomultiplicador, siempre y cuando la relación de S/R sea lo suficientemente grande.

2.12 Electrónica Asociada a los Detectores.

A. Para el fotomultiplicador RCA-1P21. el fotomultiplicador esta encerrado junto con las resistencias R de los dinodos en una caja fría que lo mantiene a muy baja temperatura (-75°C); manteniendo cerrado el obturador evita que llegue radiación luminosa al fotocátodo permitiendo medir la corriente oscura del detector. Al abrir el obturador, la radiación luminosa incide, el fotomultiplicador da una respuesta en corriente eléctrica que es enviada a través de un filtro pasabajos a un fotómetro de Pacific Instruments, que tiene en su entrada un amplificador operacional con alta ganancia. Dependiendo de la señal que esta llegando se ajusta la ganancia en corriente para ser leída en un medidor analógico con que cuenta el fotómetro y a la vez éste prepara a la señal para enviarla a un convertidor de voltaje a frecuencia VFC-32 de Burr Brown; éste a su vez a un contador de pulsos y finalmente la acopla a un registro lógico o a un sistema de microprocesador para su procesamiento aritmético. La señal del fotomultiplicador es llevada siempre através de cable coaxial para evitar ruido o falsa tierra. Algunas características importantes del fotomultiplicador se listan en el Apéndice B.

Fotómetro Pacific Photometric Instruments, Modelo 17.

El fotómetro acepta señales en corriente de tubos fotomultiplicadores, despliega la amplitud de la señal en el medidor, y prepara la señal para acoplarla a los requisitos de una gran variedad de registradores, potenciométricos o galvanométricos. El instrumento tiene capacidad de cancelar la corriente oscura y puede usarse con cualquier fuente de poder de alto voltaje para alimentar al fotomultiplicador. Los dos circuitos, de medición de corriente y de cancelación, son bipolares.

El fotómetro esta construido para proveer el intervalo dinámico necesario para medir señales de la mayoría de los tubos fotomultiplicadores. Este gran intervalo va desde $100 \mu\text{A}$ hasta $100 \mu\text{A}$ a escala completa, está acoplado con gran precisión para tener registros en papel graficador y otro despliegue.

El medidor situado en el frontal del instrumento tiene tres escalas; las primeras dos son lineales (0 a 30 y 0 a 100). Estas escalas se usan en transmitancia, fotometría, trabajo de centelleo, mediciones de luminiscencia y

fluorecencia. La tercera escala es el logaritmo del recíproco de la escala de 0 a 100, escala usada para medir densidad óptica. La sensibilidad del instrumento permite tener intervalos de seis décadas a escala completa.

La señal que sale del fotomultiplicador se hace a través de un cable coaxial, va directamente a la entrada del fotómetro para ser medida. La salida es enviada a un filtro pasabajos (para eliminar señales de alta frecuencia). Al convertidor de voltaje a frecuencia, de aquí se puede seleccionar la conexión al enviarla a un contador con despliegue digital (módulo de control de integración) o si se desea al sistema de microprocesador con que cuenta el espectralfotómetro estelar. En los pasos intermedios se puede monitorear la señal con la ayuda de un osciloscopio.

Fuente de Alto Voltaje. Unidad comercial convencional de alto voltaje regulado para activar al fotomultiplicador. Conviene que cuente con selectores de voltaje proporcionado a los dinodos, polaridad y salida de cable coaxial de HV por seguridad. Las tres principales recomendaciones que se deben tener presente al operarla son:

- 1) VOLTAJE EN POLARIDAD NEGATIVA
- 2) NO EXCEDER EL VOLTAJE MAXIMO DE OPERACION DEL FOTOMULTIPLICADOR RCA-1P21
- 3) NO EXPONER AL FOTOMULTIPLICADOR A LA LUZ DEL DIA O UNA FUENTE MUY BRILLANTE (EJ. LUNA) CON EL VOLTAJE DE OPERACION ACTIVADO.

El fotomultiplicador se ha operado dentro de sus especificaciones, entre -750 V a -1000 V, manteniendo el voltaje seleccionado constante durante toda la sesión de observación para evitar ruido.

B. Para el detector de silicio EG-G SND-140

Este tipo de detectores son muy sensibles al espectro del visible y mejoran en el cercano infrarrojo para decaer alrededor de 1.1 μm . Cuentan con una serie de propiedades que los hacen muy atractivos para la detección de poca radiación electromagnética como son: bajo ruido, operación lineal y un intervalo espectral grande.

Tomando en cuenta las características anteriores y las condiciones de medición de los flujos de radiación de las líneas espectrales particularmente hacia las longitudes de onda largas; seleccioné el fotodiodo de EG-G el SND-140 y se diseñó un circuito que contiene un amplificador de bajo ruido.

El circuito que se uso para el fotodiodo se muestra en la Fig. 11 en donde se tiene al fotodiodo operando en modo fotoconductor en polarización inversa,

conectado por su cátodo a un divisor de voltaje que le permite tener un intervalo dinámico de 15V. Ante la presencia de radiación, para la línea espectral H_{α} de aproximadamente 0.7 de magnitud fotométrica, equivalente a un flujo $\Phi_v \approx 3.13 \times 10^{-23}$ watts $m^{-2} Hz^{-1}$, fotodiodo da una corriente típica de 5pA que circula por una resistencia de $10^9 \Omega$. Esta resistencia es la de retroalimentación de un amplificador operacional AD545 que debe mantener aproximadamente 0V en sus entradas inversoras y no inversora, dándonos un voltaje de salida $V_{S1} = 10^9 I = 5mV$.

A continuación se tiene un filtro pasabanda que tiene una ganancia de 500. La señal de 5mV nos la proporciona el amplificador operacional que es $V_{S2} = 2.5V$ suficiente y dentro del intervalo dinámico de lógica TTL de 0 a 5V, que es la que maneja el convertidor de voltaje a frecuencia y el microprocesador. El filtro pasabanda debe recortarse para bajas frecuencias en 10 Hz y para alta frecuencia en aproximadamente 3KHz por consiguiente las constantes de tiempo de sus filtros son: $R_1C_1 = 0.1$ seg. y $R_2C_2 = 0.3$ mseg. respectivamente, dándonos los valores que se muestran en el circuito de la Fig. 11.

Como en el caso del fotómetro Pacific Instruments, aquí también la salida de este segundo amplificador operacional 741 es enviada a un filtro pasabajo, al convertidor VFC-32 y los pulsos que se obtengan son enviados al sistema microprocesador para su procesamiento. Es conveniente hacer notar el número de pulsos que da el convertidor de voltaje a frecuencia son proporcionales a la amplitud de la señal cuadrada dada por el amplificador, a su vez esta amplitud es proporcional al flujo luminoso que proviene de la línea espectral a medir. Así que para el continuo (c), línea (l) y cero (z) tenemos diferentes número de pulsos, cuando tenemos perfectamente centrada a la línea en las rendijas del chopper. Si es una línea de absorción $l < C$, si es línea de emisión $l > c$, para ambos casos se espera siempre que l y c sean mayores que z. Lo anterior se muestra en la Fig. 13.

En resumen el detector de silicio y su amplificador tienen las siguientes condiciones de trabajo:

- Intervalo del visible y cercano infrarrojo
- Es enfriado a temperatura de hielo seco para disminuir ruido térmico
- Modo fotoconductor para mayor eficiencia
- El amplificador operacional de Analog Devices AD545 tiene entrada FET y es de muy bajo ruido, operando como convertidor de corriente a voltaje. Ver Apéndice B.

- El segundo amplificador operacional de Intersil 741 da una ganancia de 500, con un ancho de banda de aproximadamente 3 KHz.
- El voltaje V_{S2} va de 0 a 10 V para generar de 0 a 2560 pulsos. Durante los tiempos de integración que varían de 30 a 270 segundos.
- La frecuencia de choqueo es de aproximadamente 30 Hz quedando perfectamente dentro del intervalo de operación del filtro pasabanda.
- El segundo amplificador también funciona como un filtro pasabanda. A bajas frecuencias elimina el ruido $1/f$, a altas frecuencias esta dentro del intervalo que el contador del microprocesador puede leer el número de pulsos \leq a 2560.

En el convertidor de voltaje a frecuencia VFC-32 de Burr Brown se puede controlar su intervalo dinámico de trabajo con el potenciómetro de 50 K Ω y el número de pulsos de salida con el potenciómetro de 20 k Ω , los pulsos serán codificados por las señales de los sensores A, B y C. Los pulsos, las señales de codificación y las que proporciona el modulo de control van a parar al puerto de entrada A del sistema de microprocesador; para su procesamiento aritmético y posterior despliegue en forma impresa.

CAPITULO III

SISTEMA DE PROCESAMIENTO Y EXPOSICION DE DATOS

3.1 Introducción.

Se ha diseñado un espectrofotómetro estelar para aplicaciones astronómicas. El instrumento al proporcionar el espectro electromagnético del objeto estudiado, permite que sean seleccionadas líneas y continuos espectrales por medio de un modulador mecánico (chopper). Estos son detectados fotométricamente, las señales amplificadas y enviadas a un convertidor de voltaje a frecuencia. Señal que es enviada a un puerto de entrada de un sistema microprocesador de la serie M6800. El modulador mecánico tiene tres sensores que codifican la información a partir de que se inicia el tiempo de integración, estos pulsos entran por un puerto del sistema del microprocesador que contiene una memoria EPROM de 2 k bytes con un programa que procesa la información para finalmente enviarla a través de un puerto de salida a una impresora.

3.2 Descripción General del Sistema Modular.

A) La Microcomputadora MEK6800D1.

Este equipo contiene dispositivos a los cuales se le pueden conectar algunos periféricos de nuestra elección y que permiten completar el sistema de microcomputadora para procesar la información que proviene del amplificador del espectro fotómetro estelar.

La tarjeta principal (MEK 6800C) del sistema está específicamente diseñada para que en ella esté contenido todo el sistema de la microcomputadora y contiene las siguientes componentes NMOS:

1	MPU	MC6800L	- - -	Unidad central de proceso
2	PIA	MC6820L	- - -	Módulo de interface periférica
1	ACIA	MC6850L	- - -	Módulo de interface de comunicación asíncrona
5	RAM	MCM6810L-1	-	Memoria volátil
1	EPROM	MCM2716	- -	Memoria permanente programable

Además el sistema MEK6800D1 tiene en la tarjeta impresa principal las siguientes opciones:

- Tarjeta de circuito impreso (MEK6800C)
- Interface para RS232 y TTY para operación de 10 cps ó 30 cps.
- Interruptor de RESET
- Programa de diagnóstico y de carga MIKBUG
- Dispositivos de entrada y salida en paralelo y en serie (PIA y ACIA)
- Memoria expandible

Esta tarjeta está montada en un módulo que contiene la fuente de poder con los voltajes típicos de operación de los elementos mencionados. Al frente del módulo está el interruptor de encendido de RESET, NMI, IRQ y el conector múltiple de los puertos A y B. En la parte posterior está localizado el conector tipo RS232 y el cable de la línea 110 V a 60 Hz.

B) El Modulo de Control (Sistema de Codificación).

Es una unidad aparte que envía hacia el puerto en paralelo A de entrada del sistema microprocesador tres señales decodificadas que provienen de los sensores que ven a las ventanas colocadas en el disco giratorio que sirve de modulador mecánico, estas señales cuadradas corresponden cada una a las secciones del espectro a estudiar, Fig. 13. Por otro lado se tienen cuatro señales que provienen de un interruptor digital (TW) en código BCD y una señal de transición de uno a cero (\downarrow) en la línea de control CA1 (señal de inicio). Estas siete líneas más la señal del convertidor de voltaje a frecuencia (V/F) y la de control forman el conjunto completo de conexiones de este periférico con la microcomputadora, Fig. 14. Además la unidad cuenta en forma independiente con un reloj digital, fuente de poder y conectores múltiples.

C) La Impresora Trendcom 100.

Esta permite escribir hasta 40 caracteres por segundo y contiene un conjunto de 96 caracteres alfanuméricos. Es una impresora inteligente con una capacidad de almacenar una línea completa de caracteres e impresión bidireccional. Después

de que una línea ha sido impresa de izquierda a derecha, el microprocesador interno examina la siguiente línea. La cabeza de impresión se mueve hasta el último carácter de la línea a ser impresa y la imprime de derecha a izquierda. Se pueden imprimir caracteres grandes y legibles en un formato de 10 caracteres por pulgada; la cabeza de matriz de punto imprime sobre papel térmico.

La impresora Trendcom 100 recibe los mandos de operación de la fuente de datos a través del puerto B del sistema del microprocesador. Todas las señales son enviadas a través del conector J4 de 20 terminales localizado en la parte posterior. La impresora reconoce datos de 8 bits en el formato ASCII, presentados en niveles TTL positivo-verdadero ("0" es menor de 0.8V, "1" es mayor que 2.4 V). Los bits de 0 a 7 son conectados a las terminales 10 a 17 respectivamente del conector J4, como se muestra en la Tabla 8. El código ASCII se muestra en la Tabla 9. Dos señales de intercambio (handshaking) están provistas. Una de éstas señales se activa (Strobe) y notifica a la impresora que un dato válido está presente en las terminales 10 a 17. El dato debe estar listo al tiempo que la señal de Strobe va hacia abajo y permanece válido al menos 25 nseg. antes de que el Strobe regrese a un nivel alto. La señal de Strobe debe estar baja por al menos 50 nseg. y no más de 10 μ seg. Ver Fig. 12.

La señal de ocupado (Busy), cuando está alta, indica que el controlador (microprocesador) de la impresora está ocupado ya que nuevos datos están presentes. La señal de Busy va hacia arriba cuando el Strobe va hacia abajo, y se mantiene alto hasta que el proceso se termina. Para un sólo carácter, esto es 100 μ seg. nominalmente. Sin embargo, si el carácter que se presenta es el último en la línea, la señal de Busy se mantendrá alto hasta que toda la línea ha sido impresa.

A la impresora conforme le son presentados los datos, estos son almacenados en una línea (buffer) de 40 caracteres. El contenido de la línea será vaciado inmediatamente después de recibir un carácter (OD) de Retorno de Carro o cuando la línea de buffer se llena. La señal de Busy permanecerá alta y ningún dato puede entrar cuando la unidad esté imprimiendo.

3.3. Propósito y Funcionamiento del Sistema Modular.

Como se mencionó en un principio las intensidades de luz que provienen de las líneas y continuos espectrales a observar es recibida por un fotodetector de silicio (Si), la señal es amplificada y enviada a un convertidor de voltaje a frecuencia Burr-Brown VFC-32. El sistema modular controla las tres señales de

codificación de los sensores del modulador mecánico del espectrofotómetro y las señales de tiempo de integración del interruptor digital (TW) y control (INICIO) que son enviadas al puerto A en paralelo de 8 bits y a la entrada de control de un PIA (MC6820L). Por el puerto B también de 8 bits se envía una señal previamente procesada y en código ASCII a una impresora Trendcom 100, Ver Figuras 13 y 14. El procesamiento de la información se hace a través de un Sistema Motorola MEK6800DI que contiene un microprocesador MC6800, memorias ROM y RAM y puertos de la serie 6820, fuente de poder, etc.; todo ensamblado en una unidad aparte del espectrofotómetro y detector para ser accionado a unos metros del telescopio.

Los datos que conviene imprimir son los del $\log_{10} (1-z)/(c-z)$, l(línea), c(continuo) y z(offset); el primero determina la variación de la línea espectral con respecto a su continuo inmediato y los últimos para determinar el comportamiento de los datos en forma independiente. Esto se lleva a cabo para diferentes tiempos de integración dependiendo de la magnitud de la estrella y el brillo de fondo del cielo, así como el número de veces que esté interesado en repetir la misma integración para propósitos estadísticos. La operación de obtener el logaritmo así como el paquete aritmético de punto flotante y el formato de impresión final, requirieron de elaborar un programa en el cual se aprovecharon algunas subrutinas de la biblioteca del M6800. El sistema requiere de aproximadamente 2k bytes de memoria volátil para el programa de procesamiento de datos.

3.4 El Programa SPECFOTO.

El propósito de desarrollar el programa es integrar la información que proviene del espectrofotómetro, realizar las operaciones aritméticas que el algoritmo impone y finalmente desplegar los datos en forma impresa de acuerdo a un formato de fácil lectura.

El programa SPECFOTO fue grabado en una memoria EPROM MCM 2716 de 2K x 8 con la ayuda del sistema microprocesador modular SWT6809. De esta forma los datos que el instrumento proporciona en el momento de la observación de la estrella, son procesados e impresos de inmediato, para su análisis.

La secuencia de operación del programa se explica a continuación recurriendo al diagrama de flujo de la Fig. 15 y a su correspondiente localización por número de bloque en el listado del programa en ensamblador. Apéndice D.

Bloque número:

0. Encender el sistema microprocesador M6800.
Encender la unidad de control y amplificador de bajo ruido.
1. Declarar las siguientes localidades de memoria del PIA MCM6820.

PIADRA EQU \$8008
PIACRA EQU \$8009
PIADRB EQU \$800A
PIACRB EQU \$800B

2. Lista de parámetros.

Localidades de memoria para el stack a partir de la A06F.
Localidades de memoria (40) para los datos a partir de la 0228.
Lista de vectores de interrupción (principio).

Contador de frecuencia. Este programa sirve para contar las transiciones negativas de uno a cero (↘) ocurridas en la entrada del bit 7 del puerto A de un PIA localizado en la dirección 8008, a partir de la detección de una transición de uno a cero (↘) en la línea CA1 del mismo puerto (señal de inicio).

3. Principia programa.

Limpia los contadores A, B, C y el registro de control anterior del PIA.
Inicializa contadores de RETARD, RETARD 1.

Declara a partir de la localidad 0200 los lugares para la línea de datos para su impresión.

4. Definir el puerto A del PIA como entrada.
5. Hubo transición en CA1?

Si implica continua, no implica regresa.

Esta transición ocurre cuando el interruptor de integración es oprimido, este interruptor (PB) se encuentra en la unidad de control del sistema espectrofotométrico.

Aquí conviene explicar que el byte del puerto A se construye de la forma siguiente:

b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	0
Y	A	N° de ciclos (BCD)			C	B	

el bit 0 contador B
 el bit 1 contador C
 del bit 2 al bit 5 señal del interruptor TW en código BCD
 el bit 6 contador A
 el bit 7 pulsos del convertidor V/F

Las cuentas de pulsos van acumulándose en las localidades.

MUML + 1	}	Contador A (línea)
NUML		
NUMZ + 1	}	Contador C (cero o offset)
NUMZ		
NUMK + 1	}	Contador B (continuo)
NUMK		

dependiendo si el bit 6, ó el bit 1, ó el bit 0 del puerto A se hallan en uno respectivamente.

El proceso de integración ocurre hasta que se completa un número determinado de ciclos de conteo, seleccionado por el interruptor digital externo, (TW), cuya salida en BCD se conecta a los bits 2, 3, 4 y 5 del puerto A del PIA. Como se ilustra arriba.

El contador de tiempo de integración cuenta con dos bytes en las localidades 190 y 191 y los dos primeros bits (b_0 y b_1) de la localidad 192 "cargados" con unos para darnos el número $b_0(2^{16}) + b_1(2^{17}) = 196,607$. De esta forma el tiempo de integración puede ir desde 30 segs. hasta 270 segs. como máximo.

El número de ciclos N se puede calcular de la forma:

$$N = 196,607 + b_2 (2^{18}) + b_3 (2^{19}) + b_4 (2^{20}) + b_5 (2^{21}) \quad -(3.1)$$

En donde b_i son los estados lógicos de los bits 2, 3, 4 y 5 del puerto A del PIA.

$$N_{\max} = 4,128,767 \quad -(3.2)$$

6. Cargar contador de tiempo de integración (T.I.) con el número 196,607. Intercala la información del interruptor digital en los bits 18, 19, 20 y 21 del contador de T.I.
7. Decrementa el contador de T. I.
8. Prueba si hubo transición (\overline{C}) en el bit b_7 del PIA.
9. Si implica continuar.
No implica continuar en RETARD. (16)
10. Lee el puerto A en los dos acumuladores.
Si implica INCA, No implica continua.
11. Incrementa el contador A y corre RETARD 1 (17).
Si hay saturación "overflow" (12) va a la subrutina ERROR (22)
Termina y regresa a principio programa.
13. Bit $b_1 = 1?$
Si implica CTAB, No implica CTAC
14. Incrementa el contador B.
Si hay saturación (12) va a la subrutina ERROR (22)
Termina y regresa a principio programa.
15. Incrementa el contador C.
Si hay saturación (12) va la rutina ERROR (22)
Termina y regresa a principio programa.
18. Decrementa el tiempo de integración.
T.I. = 0, SI implica continuar
T.I. = 0, NO implica continuar decrementado contador.

La operación de obtener el logaritmo así como el paquete aritmético de punto flotante y el formato de impresión final requirieron elaborar un programa que aprovecha algunas subrutinas de la biblioteca del M6800 de Motorola.

Como en fotometría astronómica se definen las intensidades luminosas en magnitudes se tiene $m = 2.5 \log_{10} (1-z)/(e-z)$. Por consiguiente, el algoritmo para calcular las magnitudes requiere de las operaciones que a continuación se escriben.

19. Subrutina ENLACE para los números (pulsos) del contador 1 (línea), c (continuo), z (cero) con las operaciones de RESTA, DIVISION y LOGARITMO.
20. La lista de subrutinas que utilizan punto flotante comprende:
 1. FLOFIX. Rutina matemática de punto flotante.
Operación: Cambiar a la función de punto flotante a entero.
 2. FLOFLO. Rutina matemática de punto flotante.
Operación: Cambiar a la función de entero a punto flotante.
 3. CVBTD. Conversión de binario a decimal.
 4. FLOAT. Subrutina de precisión simple punto flotante.
 5. FUNCTN. Subrutina para calcular el logaritmo natural de un número en formato de punto flotante en hexadecimal.

Programa de impresión de las letras A, B, C, L y de los números correspondientes a los valores de línea (A), continuo (B), cero (C) y logaritmo (L). Este programa de impresión está en código ASCII para la impresora TRENDCOM 100.

20. FORMATO. Formato de impresión.
21. NUMEROS. Subrutina de impresión de cuentas (números) almacenados en la línea de buffer de 40 caracteres a partir de la localidad de memoria 0200.
23. FIN. El programa termina y regresa a principio programa (3) y queda listo para iniciar otra corrida a partir de oprimir el interruptor de integración de la unidad de control.

3.5 Operación de Obtención de Datos.

El proceso de obtención de datos, procesarlos y finalmente imprimirlos cuenta con dos opciones:

A) Sistema Microprocesador Motorola MEK6800D1.

Este sistema es el descrito en la Sección 3.2 y tiene la ventaja de que todo el sistema microprocesador se encuentra integrado en una sola unidad, con la memoria EPROM MCM 2716 previamente grabada con el programa SPECFOTO. Adicionalmente se usan como unidades aparte las de control, amplificador del detector de silicio y la impresora TRENDCOM 100: Todo lo anterior aunado al instrumento espectrofotométrico. En el Apéndice E se muestra el diagrama de conexiones realizadas para modificar la memoria ROM MCM68301 de 1K a un EPROM TMS2716 de 2K bytes de memoria volátil.

Este sistema es fácil de operar ya que únicamente se necesita oprimir el botón de integración y cambiar el tiempo de integración cuando así se requiera.

B) Sistema a Microprocesador SOUTHWEST TECHNICAL PRODUCTS 6809.

Este sistema es el que ha sido utilizado en el laboratorio de microprocesadores y óptica del Centro de Instrumentos en las primeras pruebas experimentales y permitió la elaboración del programa. El programa principal SPECFOTO está editado en lenguaje Ensamblador y está guardado en disco blando (floppy disk) de 5" y 8". Toda esta opción requiere de una unidad de disco, el sistema microprocesador SWT 6809 y una unidad de RS232 con teclado; adicionalmente, las unidades descritas en la primera opción. Este conjunto es menos operativo que el primer sistema ya que, utiliza más equipo, complica el transporte e instalación de él en las condiciones de trabajo de un telescopio y cúpula astronómica.

El programa principal (fuente) está editado y ensamblado en la versión MACE del sistema operativo FLEX9 para una versión de microprocesador 6809. Las versiones de los programas que se pueden utilizar y que están grabadas en disco blando son las siguientes:

SYA . BIN	- Origen	\$3000	} + integrar
SYA2X . BIN	- Origen	\$3000	

SBUENO . BIN - Origen \$0300 }
SPECFOTO . BIN - Origen \$0300 } Dar una G + integrar

En todas las versiones se utiliza la unidad de teclado y RS232 para invocar el programa en binario, poner el contador de programa en el origen que corresponda y oprimir el interruptor de integrar cuantas veces se desee.

Las señales que provienen del detector de silicio, del convertidor de voltaje a frecuencia y de los sensores se ilustran en la Fig. 13. Estas señales junto con las del módulo de control van al puerto A del microprocesador como se ilustra en la Fig. 14. Las señales están llegando en forma ininterrumpida, pero únicamente serán tomadas en cuenta durante el tiempo de integración; al terminar éste son procesadas e impresas de inmediato. Si se desea volver a repetir el proceso simplemente se oprime el botón de integración (PB); si se desea cambiar el tiempo de integración se selecciona en el interruptor digital externo (TW).

El Apéndice C muestra una tira de papel impreso con varios ejemplos y en el formato deseado. En el Apéndice D se adjunta una copia completa del listado del programa SPECFOTO. En el Apéndice E se muestra el diagrama de conexiones del EPROM TMS 2716.

APLICACIONES ASTRONOMICAS Y RESULTADOS OBSERVACIONALES

4.1 Introducción.

El propósito de este capítulo es mostrar algunas de las aplicaciones astronómicas para las cuales fue diseñado y construido todo el sistema espectrofotométrico descrito en los capítulos anteriores. Adicionalmente se da una breve explicación al concepto de estrella de tipo temprano y el criterio que se siguió para la selección de las estrellas observadas. Asimismo se describen las etapas a cubrir en la preparación del instrumento, la técnica de observación astronómica, y finalmente el análisis de los resultados obtenidos.

El trabajo realizado con todo el sistema espectrofotométrico estuvo dirigido a analizar el comportamiento y las posibilidades del instrumento y finalmente a comparar nuestros resultados con los reportados en la literatura.

Las aplicaciones han estado dirigidas a observar diferentes líneas espectrales en el visible y compararlas con su continuo inmediato. Esto se hizo para estrellas de diferente tipo espectral, preferentemente las estrellas conocidas como tempranas, pues estas tienen regiones en su espectro donde está bien definido el continuo en la vecindad de las líneas espectrales de interés astrofísico.

El trabajo se hizo con todo el sistema espectrofotométrico; esto es, espectrofotómetro, sistema de adquisición de datos, despliegue de información e impresora. Las observaciones astronómicas se hicieron con los telescopios de .84m y 1m de óptica principal de los Observatorios de San Pedro Mártir, Baja California y de Tonantzintla, Puebla, respectivamente, del Observatorio Astronómico Nacional (Instituto de Astronomía, UNAM).

4.2 Las Estrellas de Tipo Temprano.

Como en el cielo tenemos muchas estrellas, es difícil estudiar con detalle cada una de ellas. Un propósito de la clasificación espectral es encontrar estrellas prototipo que sean representativas de un grupo. Posteriormente uno o dos miembros de este grupo podrán ser estudiados con más detalle, para determinar su

temperatura, presión y composición química. El criterio espectral elegido para propósitos de clasificación es primero escogido para agrupar a las estrellas de acuerdo a su temperatura superficial. El tipo espectral es de tal forma arreglado que la temperatura en su atmósfera estelar se incrementa cuando se va desde las de tipo espectral A, tipo B8 hasta B0 y terminar con las estrellas O. Cuando ya se tiene esta ordenación, otros criterios se usan para arreglar a las estrellas de acuerdo a la presión del gas en su atmósfera.

Las estrellas con la menor presión de gas en su atmósfera en general tienen la mayor luminosidad. Al cambiar las temperaturas y presiones modificarán significativamente la apariencia de su espectro estelar. Sin embargo, al examinar con más cuidado estos espectros, son encontradas más diferencias. Esto parece indicarnos que las estrellas pueden ser ordenadas de acuerdo a un tercer parámetro. Uno de los problemas de actualidad ha sido la clasificación espectral para aislar a ese tercer parámetro y establecer un criterio para reconocerlo. Un posible tercer parámetro es la edad de la estrella, que se muestra al cambiar la composición química de la atmósfera estelar. Sin embargo, existen otras causas físicas que pueden afectar fuertemente la apariencia del espectro estelar y son; los campos magnéticos y la fracción de energía que es transportada mecánicamente.

La historia de la clasificación espectral fue compendiada por R.H. Curtis (1932). Las primeras observaciones de espectros estelares fueron hechas con espectroscopios de visión directa, y los trabajos más sistemáticamente realizados fueron hechos por Secchi en los últimos años del siglo XIX. Como las estrellas que ahora son clasificadas como tipos O y B tienen un espectro de apariencia relativamente sencilla porque contiene solamente unas cuantas líneas bien marcadas de los elementos ligeros: H y He. McLean (1898) pensó que se trataba de estrellas en sus primeras etapas de desarrollo. De aquí el nombre de "estrellas de Tipo Temprano".

Las estrellas que nos interesan están clasificadas como tipos B y O en el catálogo Henry Draper (HD). Las líneas de observación dominantes que aparecen en el tipo B son las líneas de Balmer del hidrógeno y las líneas de helio neutro (HeI). La mayoría de las estrellas están clasificadas como los tipos B8, B5, B2, B1 ó B0; mucho menos estrellas están dadas como los tipos B9, B7, B6, B2.5, B1.5, B0.5. En las estrellas de tipo O las líneas de absorción dominantes son las líneas de Balmer del hidrógeno, las líneas de HeI y la serie de Pickering del helio una vez ionizado (HeII). Otras estrellas que podemos agregar a la lista de estrellas de tipo temprano son las estrellas conocidas como Wolf-Rayet que contienen en sus espectros líneas correspondientes a iones de carbono y nitrógeno particularmente intensas. Finalmente incluir a las estrellas de tipo A cuyos espectros suceden al siguiente grado de complejidad y

muestran las líneas de hidrógeno más anchas, especialmente en las conocidas como estrellas de secuencia principal.

En resumen el espectro estelar se caracteriza por:

Tipo O. Las líneas de helio ionizado, oxígeno, y el nitrógeno aparece en compañía con las de hidrógeno. El tipo Wolf-Rayet (W) contiene líneas intensas de carbono y nitrógeno. Ejemplo de estrella ρ Ori, y ζ Ori.

Tipo B. Las líneas de helio neutro son más intensas para las B2 y después decaen hasta las B9 donde prácticamente desaparecen. Las líneas de hidrógeno se incrementan en intensidad de las B0 a las B9, de un extremo a otro de las subdivisiones de las estrellas B. Ejemplos de estrellas son Spica y Rigel.

Tipo A. Las líneas de hidrógeno logran su máxima intensidad en A2. Ejemplos de estrellas Sirio y Vega.

En 1943 Morgan, Keenan, y Kellman publicaron un Atlas de Espectros Estelares donde se definía un sistema de clasificación en dos dimensiones para estrellas que cubrían tipos espectrales desde O a M. En éste trabajo tan importante (que significó el establecimiento del sistema MKK de clasificación espectral) se enfatizó que las clases espectrales deberían ser definidas en términos de estrellas estándares, y que la clasificación debería realizarse comparando espectros obtenidos en condiciones similares. La clasificación espectral fue posible con base en la temperatura superficial, proponiendo una secuencia de temperatura decreciente como sigue: O, B, A, F, G, K, M. Las temperaturas para las de Tipo O (50,000 °K), siguiendo la secuencia decrecen hasta las de Tipo M (3,000 °K). El concepto de clase de luminosidad fue introducido para diferenciar estrellas de aproximadamente la misma temperatura superficial o condiciones de excitación, pero de diferente luminosidad intrínseca. Estas clases están designadas por números romanos y están relacionadas para indicar sus tamaños relativos (luminosidades) de las estrellas: I (supergigante), II (gigante brillante), III (gigante), IV (subgigante) y V (enana o estrella de secuencia principal). Para las supergigantes el símbolo Ia indica muy luminosas y el Ib menos luminosas.

Las estrellas tempranas, que son muy calientes y luminosas, son ideales para investigar la estructura estelar y galáctica, porque se pueden encontrar a grandes distancias, además de que a través de estas estrellas es posible conocer la estructura y evolución de las estrellas más masivas.

Existen dos tipos de información que puede obtenerse de estas estrellas: información astrofísica; acerca de su estructura y constitución física e información cinemática, acerca de sus movimientos y distribuciones espaciales.

Esta información principalmente es encontrada al estudiar el espectro de las estrellas tempranas, sus colores y magnitudes. Las dificultades técnicas para observar este tipo de estrellas nos han impuesto limitaciones en su conocimiento; es bueno mencionar brevemente cuáles han sido estas dificultades y limitaciones. Gran parte del trabajo hecho antes de 1940 estaba limitado al intervalo espectral de $3800 \text{ \AA} - 5000 \text{ \AA}$, que se realizaba con óptica de vidrio, espectrómetros de prisma y placas fotográficas con emulsiones sensibles a dicha región espectral. Desde hace tres décadas hasta el presente, el intervalo espectral ha sido ampliado considerablemente de 3050 \AA en el ultravioleta hasta 20 micras en el infrarrojo. Esto último ha sido posible gracias a la nueva tecnología de detectores que se ha desarrollado. Aún así, todavía encontramos algunas limitaciones en los extremos de este gran intervalo espectral; a saber, en la atmósfera terrestre está presente el ozono que nos limita hacia el ultravioleta, asimismo también está presente vapor de agua que nos limita hacia el infrarrojo. Actualmente, estas limitaciones han sido espectacularmente superadas con la ayuda de telescopios y mejores detectores colocados en satélites espaciales.

La información que se tiene ha sido obtenida de espectrogramas estelares, de mediciones fotométricas; determinando sus colores y magnitudes con la ayuda de filtros ópticos de un gran ancho de banda o con filtros de interferencia que tienen un ancho de banda muy angosto ($\sim 10 \text{ \AA}$), de medidas astrométricas de paralaje y movimientos propios y de la distribución aparente de este tipo de estrellas en el cielo.

Sin embargo todavía mucha de la información puede ser obtenida de espectrofotometría estelar, ya que la luz puede ser dispersada por prismas y rejillas de difracción y ser colectada por dispositivos más sensibles como los fotodetectores, alcanzando a observar objetos más débiles en menor tiempo de integración. Los espectros de algunas estrellas brillantes han sido estudiados en detalle usando dispositivos de alta dispersión. Aún así, espectros de dispersión media y baja, entre 30 a $200 \text{ \AA}/\text{mm}$, de estrellas más brillantes que la magnitud 10 pueden ser de gran utilidad. Muy pocos espectros de rejilla de estrellas tipo O y B más débiles que la magnitud 10 han sido reportados en la literatura. Si se usan técnicas fotométricas más eficientes, se puede ampliar la información para estrellas más débiles. Esto último se ha venido haciendo al usar filtros de banda muy angosta, Mendoza (1979).

Finalmente se sabe que la distribución aparente de las estrellas de tipo temprano está lejos de ser uniforme. Las estrellas de tipo O y B están

confinadas muy cerca al plano de la Galaxia donde el polvo interestelar y el gas están más concentrados. Las estrellas de tipo B2 y más tempranas tienden a ocurrir en cúmulos o en asociaciones. Las más numerosas son estrellas menos luminosas de los tipos B7, B8 y B9, y aparecen estar distribuidas más uniformemente, en el disco galáctico, Underhill (1966).

4.3 La Clasificación con la Fotometría de Banda Angosta.

En esta sección doy una breve explicación en que consiste este tipo de clasificación fotométrica y como fue establecida por B. Strömgren y D. L. Crawford, entre otros. Esto nos permitirá entender la relación que se puede establecer entre los índices definidos por ellos y el que aquí se define como un sistema alternativo de clasificación espectrofotométrico.

Como los tipos espectrales son asignados al considerar una multitud de detalles en un espectro estelar, hemos puesto particular atención a la intensidad relativa de líneas espectrales seleccionadas, ya que la fotometría a través de dos o tres filtros pasabanda anchos no logran determinar los tipos espectrales. Medidas fotométricas hechas a través de filtros que transmitan la radiación en intervalos angostos y colocados estratégicamente pueden determinar en forma más clara el tipo espectral y la clase de luminosidad. B. Strömgren con sus colaboradores K. Gyldenkerne y D. L. Crawford propusieron un método de medición cuantitativa de la distribución de la intensidad de la radiación como función de la longitud de onda en espectros estelares. Strömgren (1958 y 1963) publicó resúmenes de las diferentes etapas de su trabajo. El usa los seis filtros que se listan a continuación.

FILTROS DE BANDA ANGOSTA USADOS POR STROMGREN

Filtro	Tipo	λ_{max}	Ancho Medio	Comentario
a	Interferencia	5000Å	90Å	No hay líneas de H.
b	Interferencia	4861Å	35Å	Sustituido por un filtro de 15Å.
c	Interferencia	4700Å	100Å	No hay líneas de H.
d	Interferencia	4500Å	80Å	No hay líneas de H.
e	Interferencia	4030Å	90Å	No hay líneas de H.
f	Vidrio	3600Å	350Å	

Los filtros a, c, d, y e miden el brillo en regiones entre las líneas de hidrógeno. En las estrellas tipo A de secuencia principal y en las B tardías de secuencia principal en donde las líneas de hidrógeno en absorción pueden ser muy intensas y anchas, el filtro pasabanda e puede incluir parte de las alas extendidas de la líneas de la serie de Balmer en el ultravioleta (H γ) y azul (H δ).

Strömrgren propone dos índices, el índice c que se puede relacionar al tipo espectral, y el índice l que es una medida de la luminosidad en estrellas del Tipo B y A tempranas. El índice c se define como:

$$c = 2.5 (2 \log I_e - \log I_d - \log I_f) + \text{const} \quad -(4.1)$$

es por consiguiente una medida, en escala de magnitudes, del producto del brillo relativo (I_{4030}/I_{uv}) y (I_{4030}/I_{4500}). El índice l es una medida, en escala de magnitudes, de la cantidad de luz que es absorbida por la línea H β .

Se define como :

$$l = 2.5 (1/2 \log I_a + 1/2 \log I_c - \log I_b) + \text{const} \quad -(4.2)$$

Crawford (1958, 1963 a y b) publicó fotometría H β y fotometría UVB (filtros ultravioleta, azul y visible) para muchas estrellas del Tipo B. Como el índice l no es lo suficientemente sensitivo a la variación de la intensidad de la línea de absorción H β , Crawford propuso un nuevo índice, el índice β_{cr} . El usa en su sistema fotométrico con un divisor de haz para enviar una parte de la luz a través de un filtro centrado en H β que pasa un haz de ancho medio de 15 Å y la otra parte a través de un filtro centrado en H β teniendo un ancho medio de 150 Å.

El índice β_{cr} lo define como:

$$\beta_{cr} = 2.5 \left[\log I (\text{filtro de } 150 \text{ Å}) - \log I (\text{filtro de } 15 \text{ Å}) \right] + \text{const.} \quad -(4.3)$$

Las ventajas de esta fotometría es que el error promedio en β_{cr} para medidas hechas en noches diferentes es de ± 0.006 magnitudes. Adicionalmente, esta fotometría es muy eficiente y puede ser usada en condiciones de nublados y en noches "no fotométricas".

Crawford al comparar su índice β_{cr} con la fotometría UVB publicada para estrellas O y B en un diagrama de β_{cr} vs. (U-B) $_0$ estableció un diagrama que da una clasificación en dos dimensiones equivalente al diagrama de Hertzsprung-Russell,

conocido como diagrama H-R, en donde se tiene el color intrínseco contra la magnitud absoluta. Adicionalmente logra una separación de las estrellas de acuerdo a la clase de luminosidad.

Un sistema espectrofotométrico de clasificación alternativo es el que se puede definir con el presente instrumento, en donde en lugar de usar filtros de banda angosta, se utiliza una rejilla de difracción y un disco modulador que contiene rendijas muy angostas que únicamente permiten el paso de radiación que corresponda a la línea espectral de interés.

Como ya se explicó en la Sección 3.3 dada la región del espectro, se escoge la línea espectral del hidrógeno y es centrada en la rendija 1, el continuo inmediato en las rendijas c, rendijas que se encuentran en el modulador mecánico. La señal que el detector nos envía, es proporcional a la cantidad de radiación medida por l (línea), c (continuo) y z (cero) y que aparece impresa de acuerdo al formato del Apéndice C. El índice que podemos definir en magnitudes es el siguiente:

$$I_{ort} = 2.5 \left[\log (c-z) - \log (l-z) \right] \quad -(4.4)$$

en donde al continuo y a la línea se les resta la contribución de ruido (voltaje dc) del detector. Este índice I_{ort} se obtiene para cada integración de la estrella y para cada integración del cielo, cuando así se requiera. Después de varias integraciones de este tipo se puede obtener un índice promedio para ser graficado. Varios métodos de integración se explican al final de la Sección 4.5

4.4 Estrellas y Líneas Espectrales Observadas.

Con el propósito de comprobar el funcionamiento de todo el sistema espectrofotométrico y poder determinar en una primera aproximación las posibilidades de éste, se seleccionaron para su medición de intensidad de radiación; entre otras, tres líneas espectrales de gran interés astrofísico. Por mencionar algunos: - El problema de clasificación espectral y fotométrica de las Estrellas Tempranas se dificulta en la región de máxima absorción del hidrógeno. Alrededor de las estrellas tipo AOV.

- El tipo espectral (un parámetro de temperatura) en general se determina al reconocer el incremento en intensidad de las líneas espectrales metálicas. Como es el caso de las líneas de helio para las estrellas Tipo B.

- El índice α se puede correlacionar bien a las razones de pérdida de masa estelar de las estrellas BI.

Las líneas espectrales seleccionadas fueron la primera y segunda de la serie de Balmer de hidrógeno: H_{α} ($\lambda 6563$) y H_{β} ($\lambda 4861$) y una línea de Helio HeI ($\lambda 5876$), las tres líneas en el visible y su comparación se hizo con sus continuos espectrales próximos. Usando la Ec. (4.4) Se definen tres índices que corresponden a las diferentes líneas espectrales antes mencionadas:

Índice α_{ort} para la línea de hidrógeno H_{α} ($\lambda 6563$)

Índice β_{ort} para la línea de hidrógeno H_{β} ($\lambda 4861$)

Índice h_{ort} para la línea de helio HeI ($\lambda 5875$)

Los dos primeros son comparados con el índice de Crawford dado por la Ec. (4.3) y el último con el tipo espectral. Todos ellos para estrellas de tipo temprano. Las comparaciones se ilustran en las Gráficas 1, 2, 3 y 4. Para las líneas de hidrógeno se observaron estrellas en el cúmulo abierto de las Pleyades donde predominan las estrellas B tardías y las A tempranas, en su mayoría de secuencia principal. Para la línea de helio HeI se observaron estrellas del cúmulo de las Pleyades y otras que no necesariamente pertenecían a alguna asociación de estrellas. En este caso también predominaron las estrellas de secuencia principal, pero hubo algunas supergigantes y gigantes. En los dos casos predominaron las estrellas brillantes, hasta la magnitud 8, aproximadamente. Ver Tablas 10, 11 y 12.

Los parámetros de observación fueron:

A. Línea de Hidrógeno H_{α} ($\lambda 6563$)

En este caso se compara el índice β_{cr} de Crawford, con el índice α_{ort} de Ortega para la región del rojo.

- Estrellas del cúmulo de las Pleyades con Tipo Espectral B6-A2.
- Línea espectral en absorción (ocasionalmente aparece en emisión) de $\sim 16 \text{ \AA}$ de ancho en las alas próximas al continuo.
- En el espectrofotómetro se utilizó la rejilla de 600 l/mm
- Orden del espectro $m=1$ y dispersión a esta longitud de onda $\sim 20 \text{ \AA/mm}$.
- Filtro 3-66 (rojo)

- El modulador mecánico usado tiene rendijas de 1 mm para centrar la línea y ≤ 1 mm para cada una de las rendijas del continuo. Ver Tabla 7.
- Telescopio con Apertura = 1 m, f/15.

B. Línea de Hidrógeno H_{β} ($\lambda 4861$)

En este caso se compara el índice β_{cr} de Crawford, con el β_{ort} de Ortega para la región del azul.

- Estrellas del cúmulo de las Pleyadas con Tipo Espectral de B6-A2.
- Línea espectral de absorción (ocasionalmente aparece en emisión) de $\sim 30 \text{ \AA/mm}$ de ancho en las alas próximas al continuo.
- En el espectrofotómetro se utilizó la rejilla de 400 l/mm.
- Orden del espectro $m=2$ y dispersión a esta longitud de onda $\sim 30 \text{ \AA/mm}$.
- Filtro 3-71 (amarillo).
- El modulador mecánico usado tiene rendijas de 1 mm de ancho para centrar a la línea y ≤ 1 mm. para cada una de las rendijas del continuo. Ver Tabla 7.
- Telescopio de Apertura = 1 m, f/15.

C. Línea de Helio I ($\lambda 5875$)

En este caso se observó la variación de la línea espectral con el tipo espectral estelar. Por primera vez se reporta en la literatura esta variación para esta línea espectral, Mendoza et.al. (1983).

- Estrellas con Tipo Espectral de B0-B5.
- Línea espectral en absorción (ocasionalmente aparece en emisión) de $\sim 15 \text{ \AA}$ de ancho en las alas próximas al continuo.
- En el espectrofotómetro se utilizó la rejilla de 600 l/mm.
- Orden del espectro $m=1$ y dispersión a esta longitud de onda $\sim 16.5 \text{ \AA/mm}$.
- Filtro 1-75 (transparente).

- El modulador mecánico usado tiene rendijas de 1 mm de ancho para centrar a la línea y .5 mm para la rendija del continuo.
- Telescopio de Apertura =.84 m, $f/13.5$

4.5 Procedimiento del Trabajo Observacional.

La identificación de las líneas espectrales de las estrellas es la operación más delicada y requiere de paciencia y un poco de experiencia. Esto se lleva a cabo cuando se apunta con el telescopio una estrella muy brillante y si no es suficiente, en el día, apuntar al Sol. En el espectro que nos proporcione el instrumento deberán ser identificadas las líneas espectrales de interés. De suerte que las líneas de hidrógeno y helio son lo suficientemente intensas que pueden ser más fáciles de identificar que otras, además, de que los espectros en este tipo de estrellas son bastante menos "poblados" de líneas espectrales de otros elementos. Como es el caso de estrellas de tipo espectral de las F a M.

Escogida la línea espectral, como en los casos anteriormente mencionados, se posiciona la rejilla que de la dispersión lineal deseada en el orden m correspondiente y se barre el espectro dado con mucho cuidado. Por medio de la rotación de la rejilla. En el Apéndice A se explica como funciona el sistema de rotación de las rejillas y en las Tablas 3 y 5 se listan los ángulos, longitudes de onda y dispersiones lineales esperados.

El trabajo de realizar observaciones estelares requiere de varias etapas, las cuales describo a continuación:

A. La Preparación en el Laboratorio del Sistema Espectrofotométrico.

Esta etapa inicial consiste en llevar a cabo la primera alineación óptica del instrumento, así como familiarizarse con la operación del detector a usar y del sistema microprocesador. La alineación óptica debe garantizar que un haz luminoso incida en las rendijas del modulador mecánico, expresamente diseñados para permitir el paso de radiación del intervalo del espectro escogido, y que incida en el fotocátodo del detector.

La alineación óptica consiste en hacer incidir un haz luminoso en la rendija del instrumento con una relación focal que sea suficiente para llenar todo el espejo del colimador al otro extremo del instrumento, tal que al reflejarse un haz colimado, incida sobre la rejilla de difracción elegida y quede inscrito en ella el diámetro del haz colimado. Es conveniente posicionar a la rejilla de difracción en el orden $m=0$, ya que aquí se comporta como un espejo plano. La

rejilla refleja el haz luminoso hacia el espejo cámara, y con la ayuda de la perilla que da el movimiento grueso de rotación de la rejilla, este haz puede ser centrado sobre la cámara. El haz al volverse a reflejar hará foco muy cerca del plano del modulador mecánico. Con un ajuste leve de los tornillos exteriores de la portacámara, se puede obtener tanto la posición focal como la inclinación del haz, sobre el plano de las rendijas del modulador mecánico. Centrado el haz en la rendija correspondiente a la línea (1), se fija el vernier del mecanismo de rotación de rejillas. Posteriormente se coloca el detector con su lente de Fabry, se conecta a su fuente de poder, a un osciloscopio y la caja de control. La trayectoria del haz luminoso en el instrumento se ilustra en la Fig. 2.

Con el laboratorio en completa oscuridad, encendida la fuente luminosa y el equipo se puede monitorear la señal que proviene del detector y que nos muestra como esta incidiendo el haz sobre las rendijas del modulador mecánico; haciendo pequeños ajustes a los tornillos de sujeción de la cámara o de posición del modulador o de la rejilla se puede optimizar la alineación óptica.

B. Instalación en el Telescopio.

Suponiendo una correcta alineación óptica del instrumento, el cuerpo principal del espectrofotómetro es atornillado a la platina de instrumentos del telescopio, Fig. 17a. Aquí se muestra en una fotografía la disposición del instrumento en el telescopio y la localización del equipo periférico dentro de la cúpula del edificio.

Sin adosarle la caja fría, se puede apuntar una estrella muy brillante en la primera noche de trabajo; se sugieren α CMa (Sirio) o α Lyr (Vega) si se desean medir líneas de hidrógeno. Bien centrada la estrella en la rendija de entrada, con la ayuda de los periscopios del instrumento, hay que intentar verla a través del barreno que tiene el cuerpo principal, hecho específicamente para que por ahí salga el haz luminoso de la estrella. Localizado éste y sin dejar de observar a través del barreno, dejar libre el vernier y empezar a girar el dial, esto produce una rotación de la rejilla de difracción seleccionada y empezará a verse el primer orden del espectro de la estrella, en donde empezarán a desfilar las líneas espectrales, de la región del azul hasta el rojo. Con un poco de experiencia y con la ayuda de un catálogo de espectros es posible identificar las líneas espectrales más intensas. Esto último es extremadamente importante para identificar la línea correcta y centrarla en la rendija 1. Esta operación es la más delicada, tiene que hacerse con mucho cuidado y paciencia. Localizada la línea de interés, se centra y se fija el dial del vernier nuevamente. Lo mismo se hace para los órdenes consecutivos.

C. Ubicación del Equipo Periférico.

Seleccionada la línea espectral a estudiar, se instala la "caja fría" con el detector que sea sensible a la región del espectro a observar (azul, amarillo o rojo). El fotomultiplicador 1P21 es sensible al cercano ultravioleta, azul y amarillo; el fotodiodo SND-140 es más sensible al amarillo, rojo, siendo óptimo en el cercano infrarrojo. Para cada uno de estos detectores se tiene su amplificador y fuente de voltaje. El fotomultiplicador cuenta con un fotómetro comercial marca Pacific Instruments y una fuente de alto voltaje (0-1500 V) marca Fluke, para su operación. Por ser dos instrumentos masivos y pesados (~10 Kgs. en total) se colocan junto con la unidad de control y un osciloscopio en una mesa a una distancia de aproximadamente tres metros del espectrofotómetro y del telescopio. En el caso del fotodiodo, el amplificador de bajo ruido y su fuente de voltaje de $\pm 15V$, como no son tan masivos ni voluminosos, como el caso anterior, pueden ser adosados al cuerpo principal del espectrofotómetro, donde pueden ser operados cerca de la caja fría del fotodiodo y de los oculares del espectrofotómetro.

En los dos casos anteriores la señal, que proviene de los detectores y amplificador, junto con las señales de los sensores del modulador mecánico, son conducidas a través de un cable coaxial de aproximadamente cinco metros de largo, hasta el módulo de control que contiene circuitos compensadores y filtros pasa bajo. De este módulo las señales anteriores y las del tiempo de integración son enviadas al puerto de entrada del sistema microprocesador, como se explicó con detalle en el Capítulo III, y se ilustra en la Fig. 14.

El sistema del microprocesador con su fuente de poder, también es una unidad masiva y voluminosa (~10 Kgs.), que también conviene colocarla en una mesa, junto con los demás equipos como la impresora y un osciloscopio para monitorear la señal en tiempo real en diferentes puntos de prueba, Fig. 17b. Adicionalmente el osciloscopio al estar muestreando la señal del detector auxilia en la operación de centrado de la línea espectral en la rendija correcta del modulador mecánico. Es más, cuando la estrella ha sido centrada en la rendija de entrada del instrumento, se puede hacer la operación de guiado del telescopio (mantener la estrella bien centrada en la rendija para no perder luz), directamente de ver la señal desplegada en la pantalla del osciloscopio. Esta maniobra ahorra el tiempo dedicado al centrado de la estrella. Una buena operación de este tipo debe dar una señal como la parte superior de la Fig. 13.

D. Calibración y Estabilidad Eléctrica del Equipo.

Instalado el espectrofotómetro en el telescopio, el detector elegido en su caja fría, se llena esta de hielo seco pulverizado. El equipo periférico y la unidad

de microprocesador son encendidos aproximadamente media hora antes de empezar a medir la primera integración de luz. Es necesario mantener la ventana que cubre la óptica (lente de Fabry) del detector completamente obturada, para evitar luz brillante que pueda dañarlo y aprovechar para medir la corriente oscura al inicio de la sesión de trabajo. El hielo seco en la caja fría ayudará a que la corriente oscura disminuya considerablemente, obteniéndose una mejor relación de señal a ruido (S/R). Asimismo no será necesario recargar con hielo seco parte de la caja fría antes de cinco horas, dependiendo de la temperatura ambiente dentro de la cúpula del telescopio.

En este punto es conveniente mencionar que un buen sistema de tierra eléctrica es indispensable para evitar ruido de 60 Hz de la línea así como tierras "flotantes" que puedan dañar el equipo. El punto de tierra puede ser el mismo telescopio, o el contacto neutro de la línea de alimentación de 110 V a 60 Hz.

Con las condiciones anteriores se puede lograr la estabilidad de todo el sistema, permitiendo a continuación hacer el ajuste fino de la posición de la línea espectral en la rendija que le corresponde, al mover ligeramente el vernier exterior de rotación de la rejilla; adicionalmente, se hace un ajuste fino de la caja fría para garantizar que el haz luminoso incida completamente en el fotocátodo del detector. La señal monitoreada en la pantalla del osciloscopio puede ser optimizada al hacer los ajustes anteriormente descritos y/o poner en foco, en la rendija la entrada, el espejo secundario del telescopio.

Como se menciona con anterioridad si una línea espectral como $H\beta$, está bien centrada, para una estrella brillante como α Lyr, la señal será obvia en el osciloscopio, adoptando la forma de la Fig. 13. Si está con mucha ganancia el amplificador satura, al disminuir la ganancia, la señal cuadrada continua, con un ruido esperado (representado por señal quebrada) que no es significativo para la medición del flujo luminoso que proviene de la línea espectral y poderlo comparar con su continuo, Fig. 16.

E. Procedimiento de las Observaciones Astronómicas.

Como estamos interesado en medir el logaritmo del flujo relativo del continuo a la línea espectral elegida para estrellas de diferente magnitud y mismo tipo espectral, no se deben esperar variaciones significativas. Asimismo, para cambios en la ganancia del amplificador o ligeras variaciones de las condiciones atmosféricas del cielo.

Por lo tanto los siguientes métodos de observación que se describen pueden variar, pero lo importante es que las contribuciones o errores que introduzcan

se presenta cuando se tiene próxima la Luna nueva, o cuando los objetos se localizan fuera de la vecindad de alguna de las fases de la Luna. En esta situación se pueden tomar varias integraciones consecutivas del objeto estelar y será suficiente con una integración del cielo para registrar cualquier contribución en brillo de éste. Condiciones óptimas de trabajo.

C. *** cc *** cc *** cc...

Este método de trabajo se sigue cuando los objetos estelares no son muy brillantes y las condiciones atmosféricas del cielo nocturno están cambiando (nubes pasando o polvo suspendido) en dirección del objeto a observar. Estas condiciones conviene tomar varias integraciones del objeto (≤ 3) y del cielo en su vecindad (≤ 2) para considerar la contribución de este último. El método de reducción de los datos se sugiere que se promedien las integraciones correspondientes y se reste a la estelar la contribución promedio del cielo.

4.6 Resultados Observacionales.

De acuerdo a la Ec. (4.4) se definieron los siguientes índices:

A. El índice α_{ort} se comparó con el índice β_{cr} (Crawford) para 26 estrellas del cúmulo de las Pleyades. Tabla 10. La relación es lineal con pendiente cerca de uno, principalmente para las B tardías y tempranas, en ambos casos de secuencia principal. Localizadas a la derecha de la Gráfica 1. Las cruces que se salen de esta relación lineal cambiando la pendiente pertenecen principalmente a estrellas B gigantes con líneas de emisión. Una investigación amplia para estrellas A y B se encuentra hecha con fotometría de banda angosta $\alpha(16)$ $\Delta(9)$ (Mendoza 1976, 1977, 1978a y 1979), donde claramente muestra el comportamiento del índice $\alpha(16)$ vs. β_{cr} y que sirvió para la determinación del índice α_{ort} , obteniéndose una buena correlación entre ellos. Adicionalmente, Mendoza (1979) reporta que las estrellas localizadas con pendiente cerca de uno muestran un ancho equivalente $W(H_{\alpha}) > 0$; en el grupo de estrellas donde cambia la pendiente el $W(H_{\alpha}) = 0$ y finalmente para las 4 estrellas con pendiente cerca de cero el $W(H_{\alpha}) < 0$.

Haciendo una regresión lineal por mínimos cuadrados se tiene:

Para el primer caso la pendiente de los puntos es $\beta_{cr} = 1.06 \alpha_{ort} + 1.45$ con un coeficiente de determinación $r^2 = 0.98$. Para el segundo caso (cruces) se tiene $\beta_{cr} = 0.16 \alpha_{ort} + 2.51$ con $r^2 = 0.77$.

B. El índice β_{ort} se comparó con el índice β_{cr} para 27 estrellas de Tipo Temprano, algunas pertenecen a las Pleyades. Tabla 11. La relación también es lineal, con una pendiente cerca de uno, Gráfica 2. Pudiendo diferenciarse las A Tempranas (derecha abajo) y las B (centro-izquierda arriba). Aunque la dispersión de los puntos es mayor que en el caso anterior se mantiene una misma tendencia para los dos índices. La relación es en este caso $\beta_{cr} = 0.9 \beta_{ort} + 1.76$ con $r^2 = 0.88$. El índice β_{cr} es muy confiable por el bajo error reportado en la literatura. El índice β_{ort} necesita ser probado más exhaustivamente, pero los primeros resultados muestran ser prometedores y por consiguiente se puede definir un índice alternativo al dado por Crawford.

Un ejemplo que nos muestra la alta dispersión de los puntos que se pueden obtener se muestra en la Tabla 10 y Gráfica 3, donde la relación entre los índices β_{cr} y β_{ort} logra separar las estrellas B con líneas de absorción (puntos) y las estrellas B con líneas de emisión (cruces) de las A, pero no tan claramente como el caso de la Gráfica 2. La explicación del comportamiento de los puntos tan dispersos es que el centrado en la rendija 1 de la línea espectral $H\beta$ no es bueno, quedando una de las alas asomando por la rendija 1, "contaminando" la medición en cada una de las rendijas. Se considera que no se debe a posibles flexiones del espectrofotómetro para diferentes posiciones del telescopio, porque las pruebas que se hicieron para diferentes estrellas en varias noches, no muestran una desviación notable. La Gráfica 5 y 6 muestran para la línea $H\beta$ el cociente I/c vs. ángulo horario (A.H.) que tenía la estrella al momento de hacer la integración.

C) El índice h_{ort} se comparó en su comportamiento con el tipo espectral de 23 estrellas de Tipo Temprano. Todas las estrellas fueron B, y cuatro estrellas del Tipo B (con líneas de emisión). Una curva trazada a ojo sobre la Gráfica 4, muestra un máximo entre B2-B3 característico de este tipo de estrellas. La variación del índice h_{ort} de (A5876) determinada con el espectrofotómetro usando un fotomultiplicador 1P21 fue por primera vez publicada por Mendoza et.al. (1983). Este resultado contribuye a conocer el comportamiento de las líneas de helio en el visible, para estrellas B, siendo prometedor para iniciar la investigación del comportamiento de las otras en el rojo e infrarrojo. En la Tabla 12 se listan las estrellas observadas, lamentablemente los valores del índice h_{ort} los extraviamos, por consiguiente no los incluimos.

D) Comportamiento del espectrofotómetro para varias estrellas.

El propósito de este experimento fue determinar posibles flexiones mecánicas del instrumento al estar posicionado fuera del cenit. Al apuntar a diferentes estrellas con coordenadas de ascensión recta (α) y declinación (δ), el instrumento queda colocado junto con el telescopio fuera de su posición de descanso (vertical). El telescopio al estar siguiendo a la estrella en su tránsito por el cielo va cambiando de posición lentamente. Durante este tiempo se analizó si la línea espectral $H\beta$, que estaba centrada en la rendija 1, se descentraba, produciendo una gran dispersión en los datos impresos. La posible salida de la línea de su rendija podría atribuirse a las flexiones mecánicas del instrumento, de un movimiento involuntario del modulador mecánico, o del sistema de rotación de la rejilla de difracción. El comportamiento de instrumento al observar varias estrellas durante varias horas se muestra en las Gráficas 5 y 6. En donde se tienen 5 estrellas de diferente magnitud y tipo espectral que fueron observadas en promedio dos horas de ángulo horario (A. H.), antes y después del meridiano (A. H. = 0). En las gráficas las estrellas que se muestran están ordenadas con las coordenadas que van de norte a sur y algunas de las estrellas fueron observadas varias veces un par de noches. Las gráficas muestran el cociente de $1/c$ vs. A. H. (o tiempo sidereal). La variación registrada va de .1 a .2 de este cociente. Para α Leo donde se muestra la mayor dispersión de puntos. Para 10 Lac y ζ Per se tienen los puntos inferiores y superiores que coinciden en el mismo ángulo horario, pero fueron tomados en diferentes noches.

CONCLUSIONES

El diseño y construcción del espectrofotómetro para la investigación en la astronomía fue un proyecto de tesis doctoral que dio múltiples experiencias durante las tres grandes etapas que se sucedieron en la realización de este trabajo.

En la primera etapa del diseño y construcción fue necesario conocer sistemas espectrofotométricos análogos y proponer el diseño de uno que cumpliera con el propósito de medir las intensidades de líneas espectrales entre sí o con su continuo. Esto debería hacerse en forma eficiente, confiable y con versatilidad.

La solución desarrollada es la que ha sido ampliamente descrita en los primeros Capítulos y que en principio cumple satisfactoriamente con el objetivo propuesto en su diseño, que se caracteriza por contar con un mínimo de elementos ópticos, rendijas de salida y detectores altamente sensibles, lo que permite que el sistema sea versátil.

El diseño óptico tiene únicamente cuatro elementos que lo hacen sencillo y eficiente. El contar con espejos paraboloídes fuera de eje para la cámara y el colimador asegura calidad de imágenes y mínima absorción de luz. El sistema mecánico que sujeta a su vez dos rejillas de difracción con diferentes características, permite utilizarlas en diferentes ángulos y por consiguiente en varios órdenes, cambiar la dispersión y aprovechar la resolución de ellas en intervalos del espectro de interés. Finalmente en este diseño óptico el contar con un modulador mecánico de la luz, que es un disco giratorio, con las rendijas cuidadosamente hechas, para dejar pasar luz a través de ellas, permite hacer fotometría de banda angosta con eficiencia y libre de extinción atmosférica.

A diferencia de los sistemas que cuentan con filtros ópticos pasabanda muy bien determinados, no dejan de absorber parte de la luz que los atraviesa. Lo anterior no sucede con nuestro diseño con la ventaja adicional de que el disco modulador tiene las rendijas especialmente colocadas para observar los detalles espectrales de interés, al estar girando permite observar alternadamente estos detalles, vrg. línea-continuo. El concepto del diseño del modulador mecánico es innovador en este tipo de equipos.

Para la detección de la radiación luminosa, el sistema espectrofotométrico cuenta con dos tipos de detectores muy sensibles que permiten medir la luz en

todo el visible y el cercano infrarrojo, para estrellas hasta de magnitud 8, simplemente al intercambiar el fotomultiplicador RCA-1P21 por el fotodiodo EG-G SND-140. En condiciones de cielo limpio, bajo ruido electrónico y óptica del instrumento y telescopio recién aluminizada la relación de señal a ruido (S/R) mejora notablemente, permitiendo ganar hasta un par de magnitudes estelares para el mismo tiempo de integración.

El poder observar estrellas hasta de magnitud 10 aumenta la capacidad del instrumento y la posibilidad de observar muchas más estrellas.

La segunda etapa consistió en diseñar un amplificador de muy bajo ruido (NEP $\leq 10^{-16}W$) para el fotodiodo de silicio, y un filtro electrónico pasabajos (para eliminar señales $> 1kHz$) del fotodiodo y fotomultiplicador. Conectados los detectores a un convertidor de voltaje a frecuencia (que permite que una señal analógica sea traducida a una señal digital), para acoplar este sistema de detección a un sistema microprocesador Motorola MEK 6800D1. Esto permite tener una electrónica de detección de bajo ruido, dada la pequeñísima cantidad de luz que es necesario medir, registrar, procesar y finalmente desplegar en forma impresa segundos después; permitiendo a todo el instrumento ser eficiente, rápido y versátil.

La tercera y última etapa consistió en observar en promedio 25 estrellas de Tipo Temprano para que a sus líneas espectrales de interés astrofísico les fuera medido su flujo luminoso y fuera comparado con los flujos dados por su continuo. El valor de los flujos luminosos a medir es de aproximadamente $\Phi_{\lambda} \approx 10^{-12} \text{ Watts cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$. La determinación de los índices α_{ort} y β_{ort} comprobaron el funcionamiento del instrumento, permitiendo correlacionar estos índices, dados por este sistema, con índices dados por sistemas equivalentes de fotometría de banda angosta, finalmente la determinación del índice α_{ort} es reportado por primera vez en la literatura.

En resumen algunas de las propiedades importantes del instrumento son:

- 1) Alta eficiencia debido a su baja pérdida de luz como consecuencia del mínimo de reflexiones ópticas.
- 2) Gran versatilidad para seleccionar filtros ópticos, rejillas de difracción y rendijas; además de alta dispersión lineal para seleccionar los intervalos espectrales de interés.
- 3) El concepto de rendija situado en el disco modulador permite estudiar casi simultáneamente los detalles espectrales sin ser afectados por extinción atmosférica o nubes ligeras, que en otros sistemas hay que considerar.

- 4) La posibilidad de estudiar el espectro electromagnético desde el cercano ultravioleta ($.35\mu$)-visible-cercano infrarrojo (1μ) con una buena relación (S/R).
- 5) El contar con un microprocesador y con un programa en memoria que permite la reducción de la información y exponerla en forma impresa unos cuantos segundos después de la integración del flujo luminoso, permite tener gran eficiencia en el trabajo realizado.
- 6) Finalmente, un sistema espectrofotométrico como el anteriormente descrito es de gran utilidad para hacer investigación en la astronomía. Estas posibilidades se tienen en el equipo construido como parte de este trabajo. Adicionalmente el índice espectrofotométrico que se puede definir con este sistema es prometedor por la equivalencia que tiene con otros como los definidos por Crawford y Strömgren.

Este trabajo de tesis cumplió con dos grandes objetivos: 1) El poder desarrollar gran parte de la instrumentación para hacer fotometría astronómica de banda angosta y 2) demostrar la correspondencia entre sistemas astronómicos basados en esta técnica para las líneas espectrales $H\alpha$, $H\beta$ y HeI . Sin embargo, no todos los problemas están resueltos. Desde mi punto de vista este sistema espectrofotométrico tiene que ser usado más exhaustivamente para mejorar la calidad de los resultados que nos proporciona el equipo, y para que este sistema sea completamente confiable. Adicionalmente recomiendo trabajar con la misma técnica en otras líneas espectrales como son: oxígeno neutro OI ($\lambda 7774$), Calcio ionizado $CaII$ ($\lambda 8542, 8662$) y para el helio neutro HeI ($\lambda 6678, 7065$ y 10830). Para la línea de oxígeno neutro ya existe información en la literatura, pero las demás no se han investigado. Particularmente importante es la línea de HeI ($\lambda 10830$) en el infrarrojo cercano. El índice que se pueda determinar de ella será un excelente indicador de pérdida de masa y contribuirá a conocer las atmósferas estelares. Esta línea en el infrarrojo puede ser la equivalencia a la de $HeII$ ($\lambda 4686$) en el azul para la determinación de parámetros fundamentales de estrellas en sus primeras etapas de evolución.

Una de las técnicas más fructíferas en la astrofísica moderna es la clasificación espectral que tiene el inconveniente de ser demasiado subjetiva. Los resultados obtenidos con nuestro espectrofotómetro indican claramente que es posible realizar clasificación espectral cuantitativa por medio de índices fotométricos. De aquí la importancia de la técnica de espectrofotometría de banda angosta para la investigación en astrofísica.

Es conveniente decir que el diseño fue resultado de fructíferas discusiones con el Dr. Mendoza, gran parte de la construcción de los sistemas electrónicos,

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

mecánicos y ópticos fueron hechos por personal técnico bajo mi dirección en los laboratorios y talleres del Centro de Instrumentos e Instituto de Astronomía, dependencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. El desarrollo y conclusión de este proyecto requirió de varios años de trabajo y de múltiples obstáculos que tuvieron que ser superados. Esto permitió adquirir conocimientos técnicos, confianza para abordar nuevos retos en la instrumentación y la satisfacción de terminar un compromiso adquirido.

FIGURAS

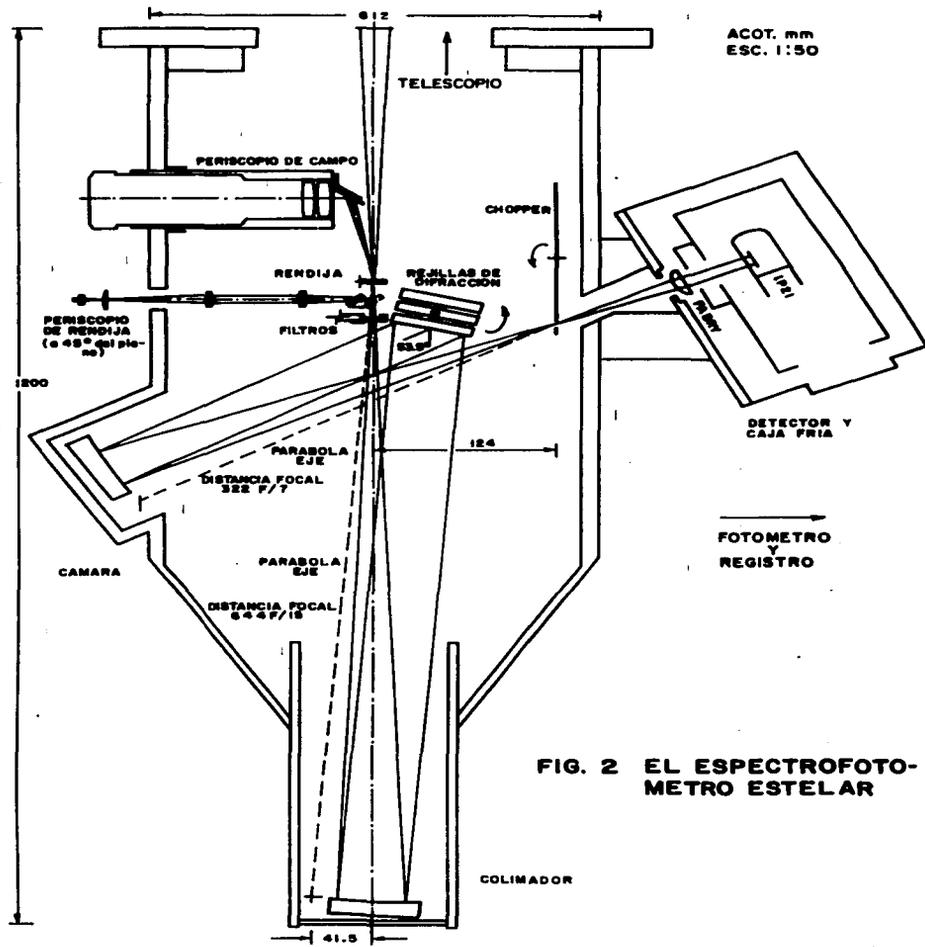


FIG. 2 EL ESPECTROFOTOMETRO ESTELAR

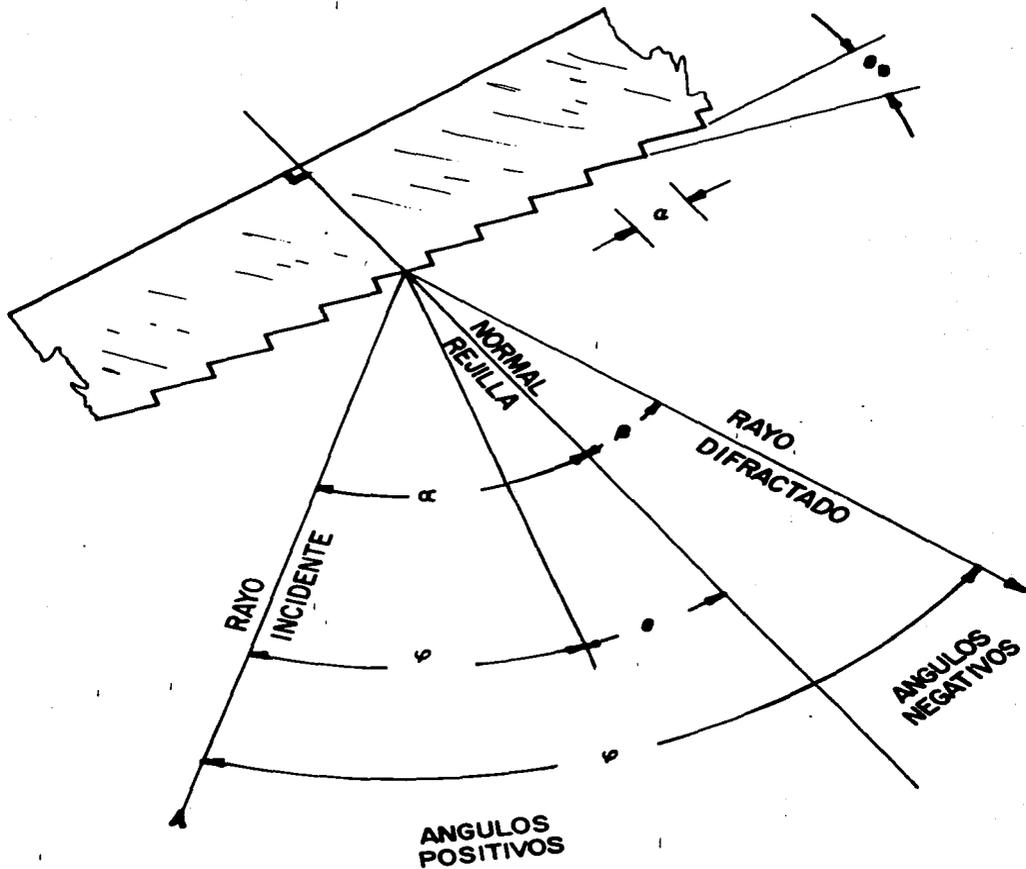


Fig. 3 REJILLA DE DIFRACCION

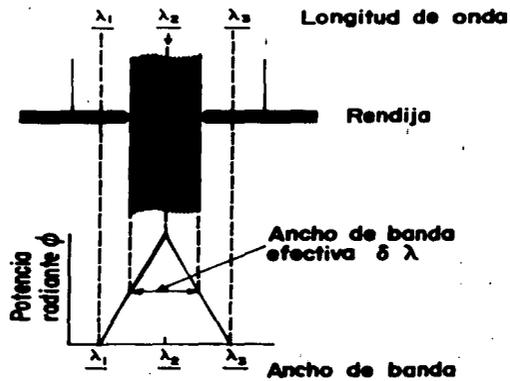


Fig. 4 Flujo luminoso incidiendo en la rendija

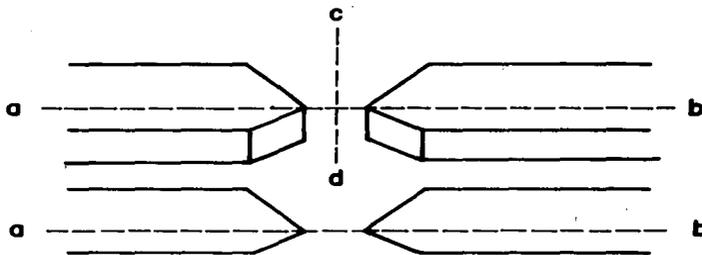
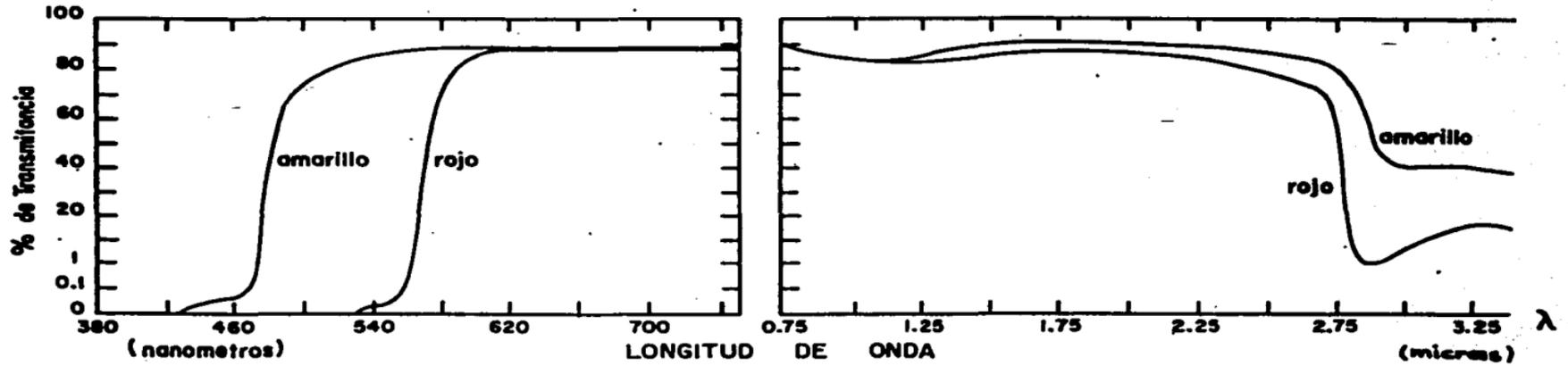
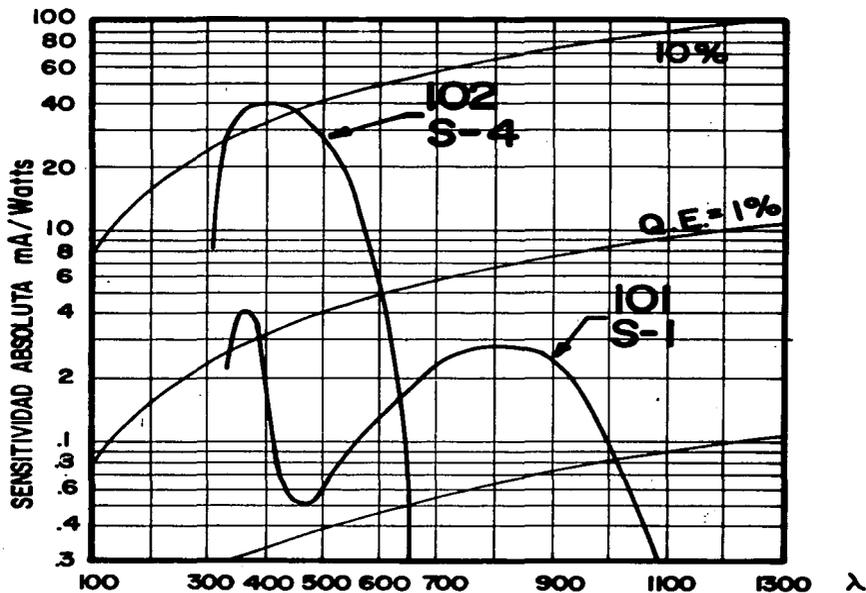


Fig. 5 Construcción de rendijas

Fig. 6



FILTROS	Número CS	Número Filtro	longitud de onda				Coeficiente Expansión	n_D	
			A	B	C	D			
para $\lambda_s = 1.3 \mu m$ rejilla 600 l/mm	3-66 t	3480	567-578	608	547	15	43	1.507	ROJO
para $\lambda_s = 1 \mu m$ rejilla 400 l/mm	3-71 t	3385	466-491	551	441	25	89	1.506	AMARILLO



LONGITUD DE ONDA - NANOMETROS
 Respuesta típica espectral del fotocátodo

Fig. 7

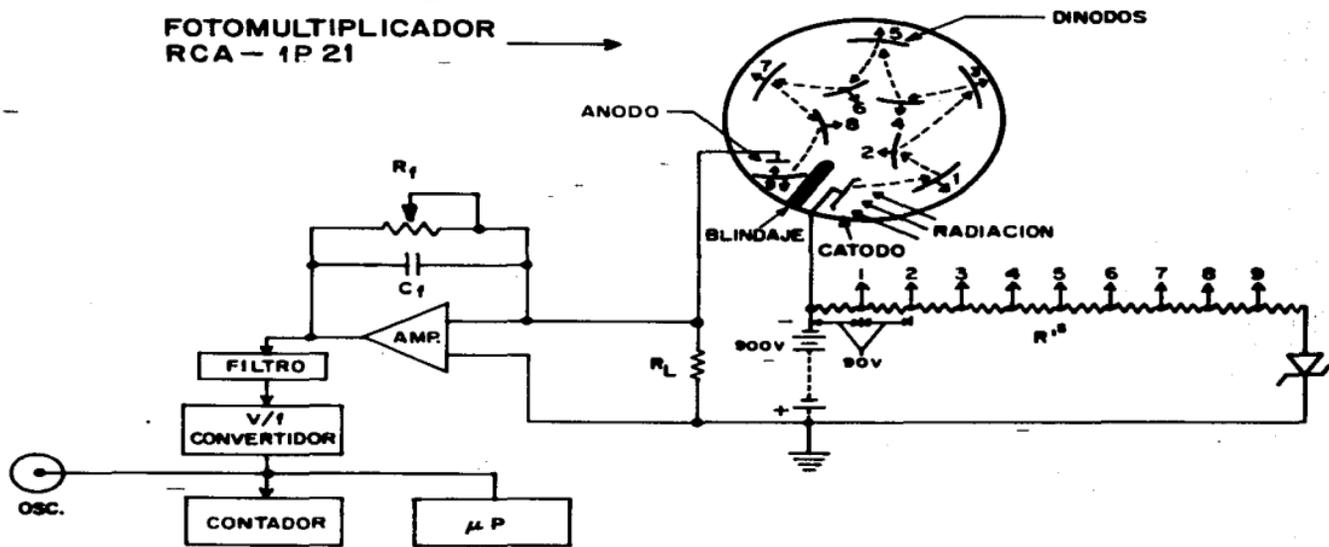


FIG. 8 TUBO FOTOMULTIPLICADOR CON ELECTRONICA ASOCIADA.

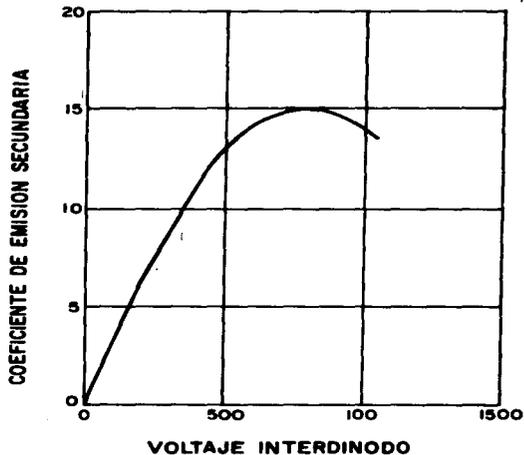


FIG. 9 COMPORTAMIENTO DE LA EMISION SECUNDARIA CONTRA EL VOLTAJE INTERDINODO EN EL FOTOMULTIPLICADOR.

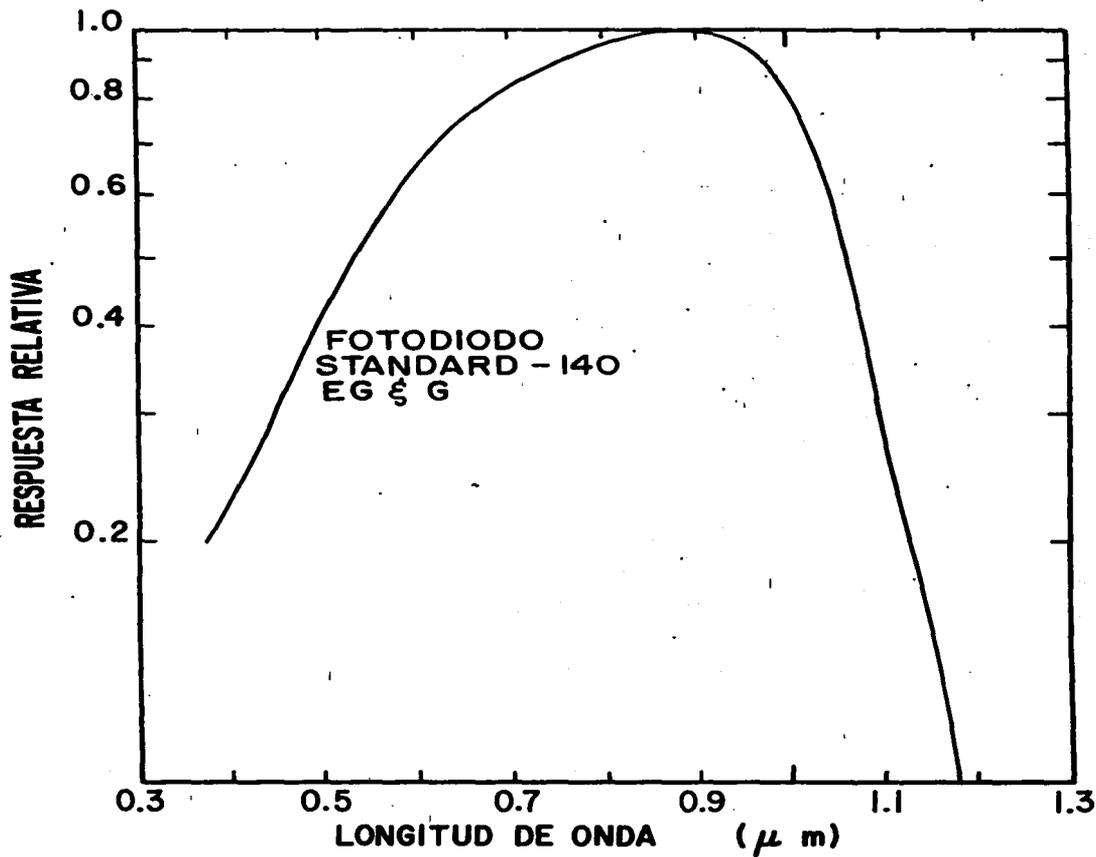


Fig. 10 RESPUESTA ESPECTRAL CONTRA λ
DEL FOTODIODO DE SILICIO

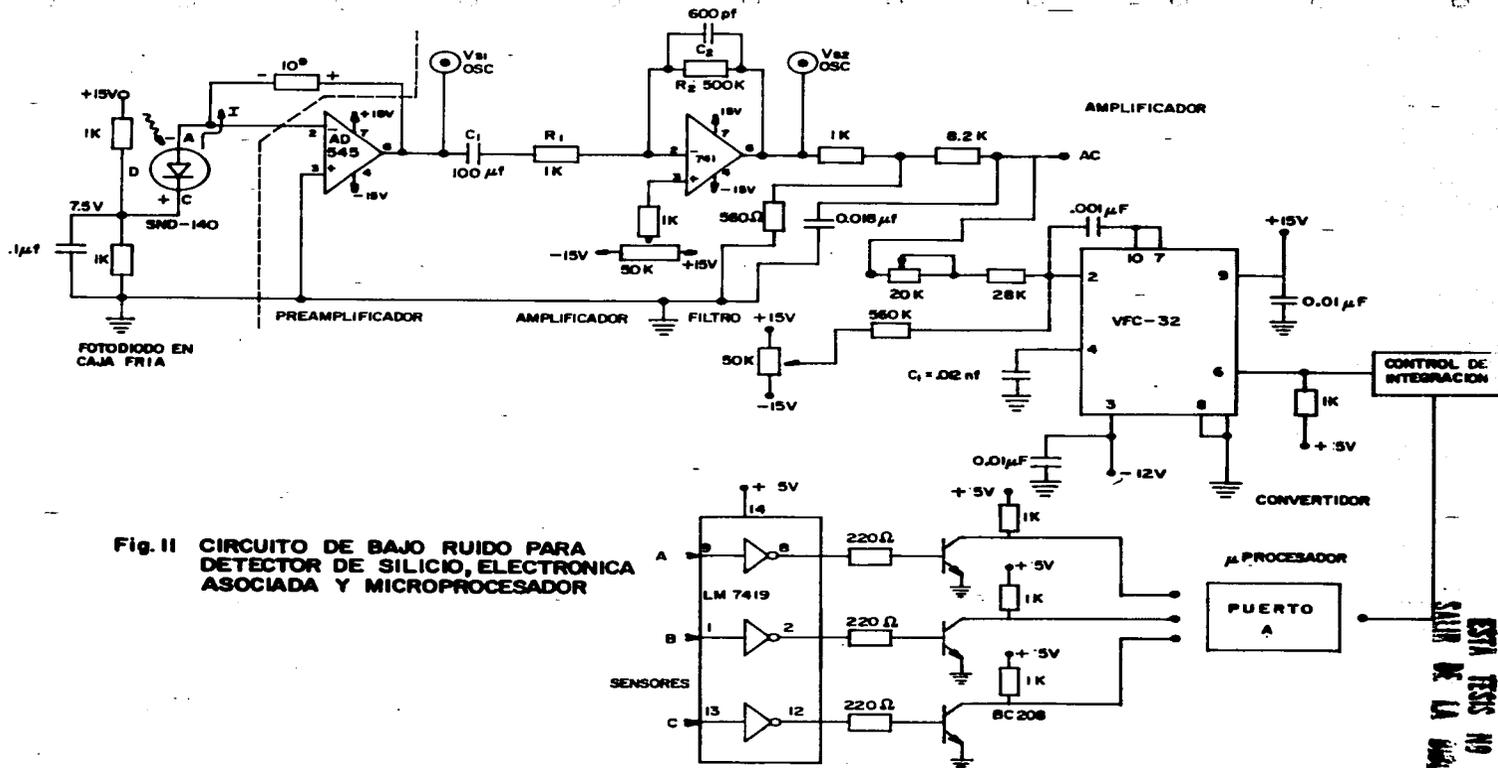


Fig. II CIRCUITO DE BAJO RUIDO PARA DETECTOR DE SILICIO, ELECTRONICA ASOCIADA Y MICROPROCESADOR

ESTA TESIS NO DEBE
 SALIR DE LA BIBLIOTECA

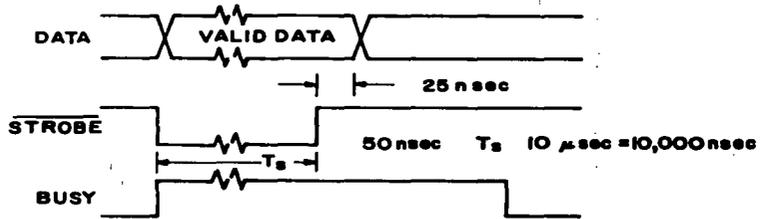


FIG. 12 SEÑALES DE IMPRESORA

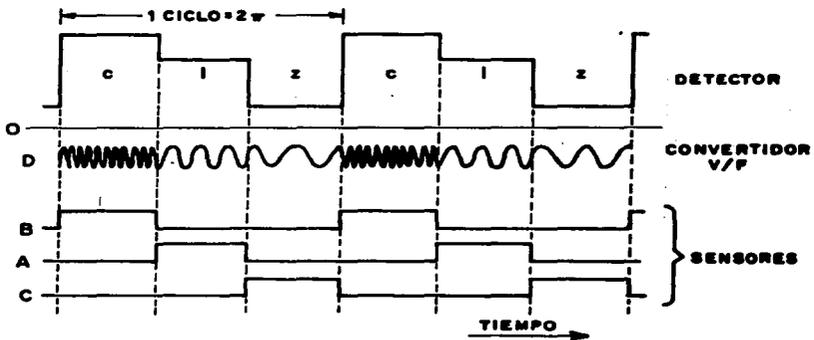


FIG. 13 SEÑALES DEL DETECTOR, CONVERTIDOR V/F Y SENSORES

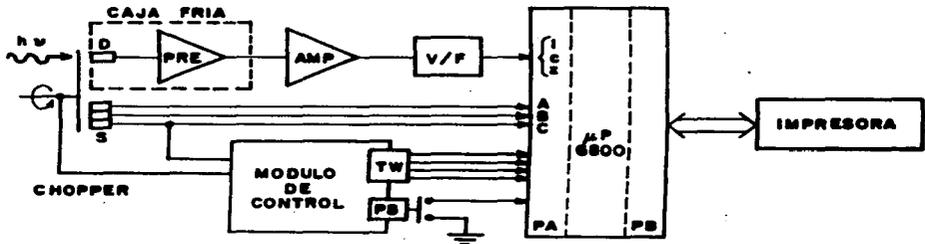


FIG. 14 DIAGRAMA DE DETECCION, PROCESO E IMPRESION

INTENSIDAD LINEAL

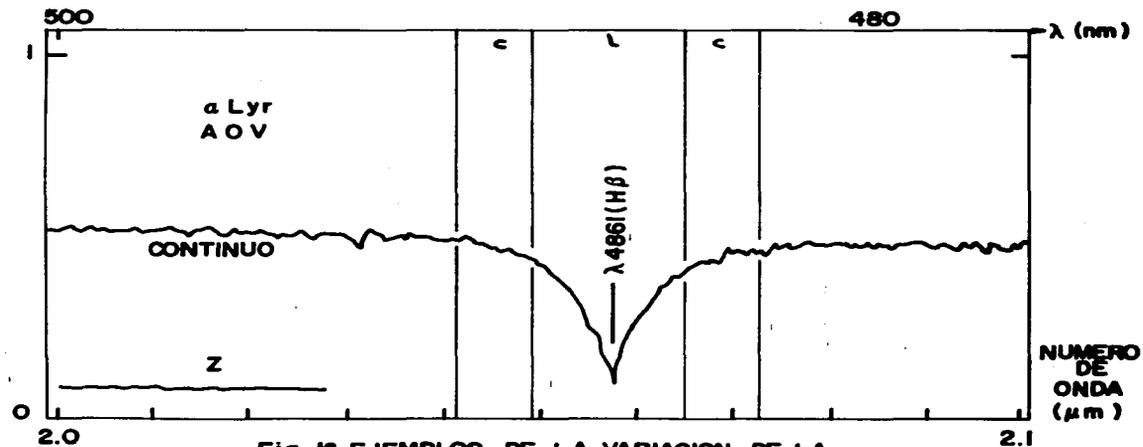
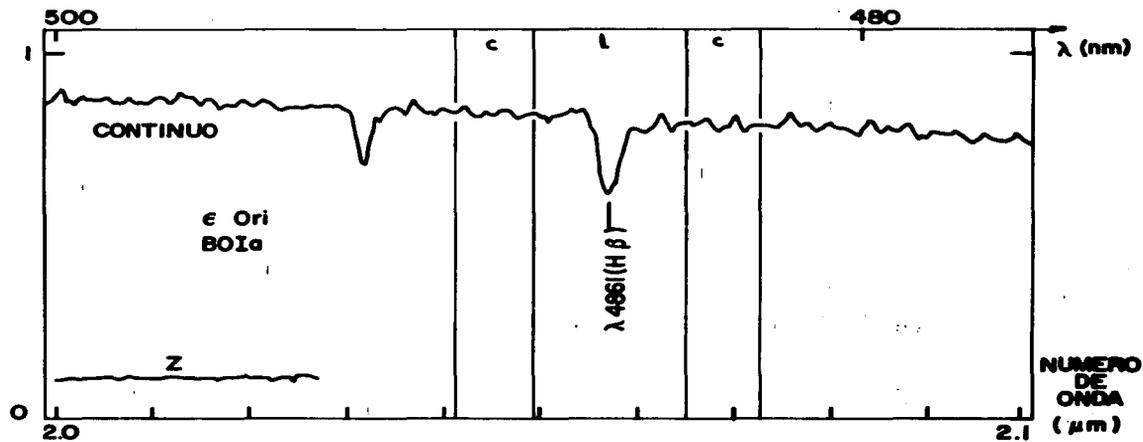
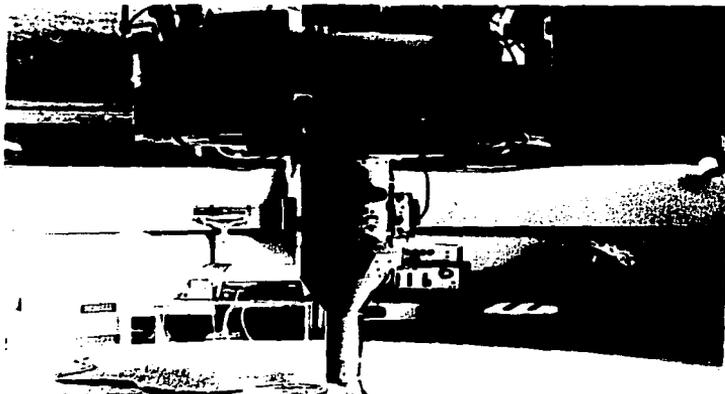


Fig. 16 EJEMPLOS DE LA VARIACION DE LA LINEA ESPECTRAL H_β CON EL TIPO ESPECTRAL ESTELAR.



- a) Al frente se localiza al espectrofotómetro sujetado a la platina de instrumentos del telescopio.
Al fondo se localiza al sistema microprocesador y equipo periférico



- b) Disposición del sistema microprocesador , y periféricos sobre la mesa de trabajo.

Fotografías del Sistema Espectrofotométrico
Fig.17

TABLAS

T A B L A N°. 1

CARACTERISTICAS OPTICAS DEL ESPECTROFOTOMETRO

Telescopio:

Apertura del telescopio	A = 1000mm
Distancia focal del telescopio	$f_{tel} = 15000\text{mm}$
Número f del telescopio	f/15

Espectrógrafo-monocromador:

Apertura de rendija de entrada	w = .3mm
Largo de rendija de entrada	h = 5mm
Diámetro del colimador	$d_{col} = 47.7\text{mm}$
Distancia focal del colimador	$f_{col} = 644\text{mm}$
Número f del colimador	f/15
Diámetro de la cámara	$d_{cam} = 46\text{mm}$
Distancia focal de la cámara	$f_{cam} = 322\text{mm}$
Número f de la cámara	f/7
Ancho del rayado de la rejilla	W = 52mm x 52mm
Rejilla 1:	
Número de surcos por mm	n = 600 1/mm
Longitud de onda de luz brillante	$\lambda_B = 1.0\ \mu\text{m}$
Angulo de luz brillante	$\theta_B = 17^\circ 27'$
Orden a usarse	m = 1
Dispersión lineal	D = 35 Å/mm
Rejilla 2:	
Número de surcos por mm	n = 400 1/mm
Longitud de onda de luz brillante	$\lambda_B = 1.3\ \mu\text{m}$
Angulo de luz brillante	$\theta_B = 15^\circ$
Orden a usarse	m = 2
Dispersión lineal	D = 27.3 Å/mm
Apertura de las rendijas de salida: $l \pm .01$ mm de ancho	
Filtros Corning: 1-75 (transparente)	, n = 1.510
3-71 (amarillo)	, n = 1.506
3-66 (rojo)	, n = 1.507
Dimensiones de los filtros: $R_1 = R_2 = \infty$ (planos),	
diámetro = 25mm	
ancho = 3mm	

T A B L A N°. 2

PARAMETROS DEL ESPECTROFOTOMETRO PARA DIFERENTES
LONGITUDES DE ONDA

Para $\tau \sim 0.7$ y $L = 4.5 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ esteradian

n (1/mm)	λ (Å)	β (°)	$\frac{d\beta}{d\lambda}$ ($\frac{1}{\text{mm}}$)	D (Å/mm)	$\delta\lambda$ (Å)	R	L x R
400 m = 2	H β (4861)	39.32	1034.19	30.03	4.50	1080	4.86
	HeI (5875)	42.00	1076.63	28.84	4.32	1359	6.11
	H α (6563)	43.84	1109.26	27.99	4.19	1566	7.05
	OI (7774)	47.12	1175.66	25.77	3.96	1963	8.83
	CaII (8542)	49.24	1225.31	25.34	3.80	2247	10.11
	λ_B (10,300)	54.22	1368.28	22.69	3.40	3029	13.63
	HeI (10,830)	55.77	1422.18	21.83	3.27	3311	14.90
600 m = 1	H β (4861)	36.14	742.96	41.80	6.3	771	3.47
	HeI (5875)	38.13	762.80	40.71	6.1	963	4.33
	H α (6563)	39.48	777.35	38.98	5.9	1095	4.93
	OI (7774)	41.89	805.98	37.59	5.7	1363	6.13
	CaII (8542)	43.42	826.15	37.50	5.6	1525	6.86
	λ_B (10,000)	46.38	869.73	35.0	5.3	1886	8.48
	HeI (10,830)	48.08	898.18	34.58	5.1	2088	9.39

T A B L A N°. 3

ANGULO DE ROTACION DE REJILLA CONTRA LONGITUD DE ONDA Y DISPERSION LINEAL

Rejilla n^om. 1: BAUSCH AND LOMB

35-53-06-600

N= 400 1/mm

a= 2.5 μ m

m= 2

$\lambda_B = 1.3 \mu$ m

$\theta_B = 15^\circ$

$\varphi = 53.5^\circ$

$\theta (^\circ)$	$\lambda_1 (\text{Å})$	$\lambda_2 (\text{Å})$	$\lambda_3 (\text{Å})$	$\alpha (^\circ)$	$\beta (^\circ)$	D (Å/mm)
8.75	6 792	3 396	2 264	-18.0	35.52	31.59
9.75	7 561	3 781	2 520	-17.0	36.50	31.20
10.75	8 328	4 164	2 776	-16.0	37.50	30.79
11.75	9 092	4 546	3 031	-15.0	38.50	30.38
12.75	9 854	4 927	3 285	-14.0	39.5	29.95
12.93	9 994	4 997	3 331	-13.82	39.68	29.87
12.94	10,004	5 002	3 334	-13.81	39.69	29.87
13.75	10,612	5 306	3 537	-13.0	40.50	29.51
14.75	11,368	5 684	3 789	-12.0	41.5	29.04
15.0 _B	11,556	5 778	3 852	-11.75	41.75	28.96
15.25	11,750	5 875	3 916	-11.50	42.0	28.84
15.75	12,120	6 060	4 040	-11.0	42.5	28.62
16.75	12,868	6 434	4 289	-10.0	43.5	28.15
17.09	13,126	6 563	4 375	- 9.66	43.84	28.0
17.75	13,612	6 806	4 537	- 9.0	44.5	27.68
18.75	14,352	7 176	4 784	- 8.0	45.5	27.20
20.37	15,548	7 774	5 182	- 6.38	47.12	25.83

Precisión en el mecanismo de rotación de la rejilla:

1^o -- 6.54 Å

1Å -- .15^o

Filtro amarillo: CORNING 3-71, n= 1.506, d= 25 mm, plano

B - Luz Brillante (blaze)

T A B L A N°. 4

LONGITUD DE ONDA CONTRA EFICIENCIA REJILLA-DETECTOR DE SI

REJILLA NUM. 1

λ_2	E_T		E_D		$E_T \times E_D$	
	m=1	m=2	m=1	m=2	m=1	m=2
3 396	.3	.1	.28	.16	.23	.02
3 781	.55	.2	.90	.2	.5	.04
4 164	.65	.3	.97	.25	.63	.08
4 546	.70	.5	1.0	.3	.70	.15
4 927	.75	.6	.88	.38	.66	.23
4 997	.75	.65	.82	.4	.61	.26
5 002	.77	.68	.8	.4	.61	.27
5 306	.8	.7	.58	.46	.46	.32
5 684	.8	.75	.20	.57	.16	.43
5 778 _B	.8	.8	.15	.60	.12	.48
5 875	.8	.8	.13	.67	.10	.54
6 060	.8	.8	.1	.65	.08	.52
6 434	.75	.7		.72		.5
6 563	.7	.65		.75		.48
6 806	.7	.6		.78		.47
7 176	.65	.4		.84		.34
7 774	.6	.3		.93		.28

B - Luz Brillante (blaze)

T A B L A N°. 5

ANGULO DE ROTACION DE REJILLA CONTRA LONGITUD DE ONDA Y DISPERSION LINEAL

Rejilla núm. 2; BAUSCH AND LOMB 35-53-06-520

$N = 600$ 1/mm
 $a = 1.66$ μ m
 $m = 1$

$\lambda_B = 1.0$ μ m
 $\theta_B = 17^\circ 27'$
 $\varphi = 53.5^\circ$

θ (°)	λ_1 (Å)	λ_2 (Å)	λ_3 (Å)	α (°)	β (°)	D (Å/mm)
11.75	6 062	3 031	2 021	-15.37	38.13	40.71
12.73	6 563	3 281	2 188	-14.02	39.48	39.95
12.75	6 569	3 285	2 190	-14.0	39.5	39.94
13.75	7 075	3 538	2 358	-13.0	40.5	39.35
14.75	7 578	3 789	2 526	-12.0	41.5	38.76
15.14	7 774	3 887	2 591	-11.61	41.89	38.53
15.75	8 080	4 040	2 693	-11.0	42.5	38.16
16.75	8 578	4 289	2 859	-10.0	43.5	37.54
17.45 _B	8 926	4 463	2 975	-9.30	44.2	37.10
17.75	9 075	4 537	3 025	-9.0	44.5	36.91
18.75	9 568	4 784	3 189	-8.0	45.5	36.27
19.73	10,049	5 024	3 349	-7.02	46.48	35.64
19.75	10,058	5 029	3 353	-7.0	46.5	35.62
19.89	10,130	5 065	3 376	-6.86	46.64	35.53
20.75	10,546	5 273	3 515	-6.0	47.5	34.96
21.33	10,830	5 413	3 610	-5.42	48.08	34.58
21.75	11,030	5 515	3 677	-5.0	48.5	34.29
22.75	11,511	5 755	3 837	-4.0	49.5	33.61
23.75	11,988	5 994	3 996	-3.0	50.5	32.92

Precisión en el mecanismo de la rejilla: 1° -- 8 \AA
 1 \AA -- $.12^\circ$

Filtro rojo: CORNING 3-66, $n = 1.507$, $d = 25$ mm, plano

B - Luz Brillante

T A B L A N°. 6

LONGITUD DE ONDA CONTRA EFICIENCIA REJILLA-DETECTOR DE SI

REJILLA NUM. 2

λ 1	E_r		E_D		$E_r \times E_D$	
	m=1	m=2	m=1	m=2	m=1	m=2
6 062	.18	.1	.65	.1	.12	.01
6 563	.25	.1	.72	.1	.18	.01
6 569	.35	.1	.73	.15	.26	.02
7 075	.4	.15	.83	.18	.33	.03
7 578	.65	.3	.90	.2	.59	.06
7 774	.65	.37	.93	.23	.62	.08
8 080	.70	.45	.96	.24	.67	.11
8 578	.75	.6	.99	.28	.74	.17
8 926 _B	.8	.7	1.0	.3	.80	.21
9 075	.8	.7	1.0	.31	.80	.22
9 568	.8	.8	.93	.34	.74	.27
10,049	.82	.75	.85	.4	.70	.30
10,058	.85	.7	.82	.4	.70	.28
10,130	.82	.65	.79	.5	.64	.32
10,546	.8	.6	.60	.46	.48	.28
10,830	.77	.5	.45	.5	.30	.25
11,030	.75	.4	.30	.52	.23	.21
11,511	.7	.3	.15	.59	.11	.18
11,988	.65	.2	.1	.65	.06	.13

B - Luz Brillante

TABLA 7

ANCHO DE LAS RENDIJAS DEL MODULADOR MECANICO

($\bar{X} \pm \sigma'$ en mm)

	LINEA		CONTINUO		LINEA		CONTINUO	
	1.	.994	.987	1.060	.980	.993	1.043	.992	1.022
2.	.999	1.014	1.033	1.017	1.011	.987	1.037	1.023
3.	1.002	.991	1.076	.980	1.020	.982	1.046	1.035
4.	.998	.974	1.080	.980	1.009	.970	1.048	1.059
5.	1.004	.999	1.078	.990	1.007	.982	1.047	1.032
6.	1.000	.980	1.064	1.001	1.011	1.010	1.037	1.030
7.	1.004	.998	1.085	.980	1.016	1.030	1.050	1.000
8.	1.004	1.006	1.078	.981	1.014	1.051	1.055	.990
9.	1.000	1.005	1.080	.995	1.005	1.047	1.046	.970
10	1.003	1.004	1.050	.994	1.020	1.042	.992	1.030
\bar{X}	1.001 \pm .003	.996 \pm .013 Radio 1	1.068 \pm .017 Centro	.990 \pm 0.012 Radio 2	1.011 \pm .008	1.015 \pm .032 Radio 1	1.035 \pm 0.023 Centro	1.019 \pm 0.026 Radio 2

EXPLICACION.

LINEA: Ancho de la rendija que permite el flujo de radiación correspondiente a la línea espectral.

CONTINUO: Ancho de las rendijas que permiten el flujo de radiación correspondiente a los continuos adyacentes a la línea espectral.

RADIO 1: Ventana hacia el rojo.

RADIO 2: Ventana hacia el azul.

CENTRO: Intervalo cerrado entre ventanas.

T A B L A 8
TERMINALES DEL CONECTOR J4

Pin	Señal	Pin	Señal
1	Ground	11	Bit 1
2	Busy	12	Bit 2
3	n/c	13	Bit 3
4	n/c Busy	14	Bit 4
5	Ground	15	Bit 5
6	Ground	16	Bit 6
7	Ground	17	Bit 7
8	Strobe	18	+15v
9	Ground	19	Test
10	Bit 0	20	Ground

CB1 -----> (points to pins 1-7)
 CB2 -----> (points to pins 8-10)

T A B L A 9
CONVERSION DE HEX a ASCII

20	SP	38	8	50	P	68	h
21	!	39	9	51	Q	69	i
22	"	3A	:	52	R	6A	j
23	*	3B	;	53	S	6B	k
24	\$	3C	<	54	T	6C	l
25	%	3D	=	55	U	6D	m
26	&	3E	>	56	V	6E	n
27	'	3F	?	57	W	6F	o
28	(	40	@	58	X	70	p
29	)	41	A	59	Y	71	q
2A	.	42	B	5A	Z	72	r
2B	+	43	C	5B	[	73	s
2C	,	44	D	5C	\	74	t
2D	-	45	E	5D	]	75	u
2E	.	46	F	5E	^	76	v
2F	/	47	G	5F	_	77	w
30	0	48	H	60	`	78	x
31	1	49	I	61	a	79	y
32	2	4A	J	62	b	7A	z
33	3	4B	K	63	c	7B	{
34	4	4C	L	64	d	7C	|
35	5	4D	M	65	e	7D	}
36	6	4E	N	66	f	7E	~
37	7	4F	O	67	g	7F	DEL

TABLA 10

ESTRELLAS OBSERVADAS PARA H β (λ 4861) y H α (λ 6563)

H α	*	MK	V	β_{ort}	Δ_{ort}	β_{scr}
117	16 Tau	B7 IV	5.46	1.181	1.229	2.750
126	17 Tau	B6 III	3.70	1.043	1.115	2.691
150	18 Tau	B8 V	5.65	1.081	1.230	2.746
156	19 Tau	B6 V	4.30	1.044	1.173	2.702
216	HD 23387	A1 V	7.22	1.296	1.335	2.869
242	20 Tau	B7 III	3.87	1.023	1.166	2.690
248	HD 23410	A0 V	6.85	1.584	1.350	2.899
255	21 Tau	B8 V	5.76	1.038	1.271	2.793
265	22 Tau	B9 V	6.43	1.029	1.305	2.823
323	23 Tau	B6 IVnn	4.18	1.056	0.869	2.642
341	HD 23489	A2 V	7.40	1.624	1.380	2.907
371	HD 23512	A0 V	8.16	1.629	1.381	2.909
436	HD 23568	B9.5 V	6.83	1.673	1.328	2.849
508	HD 23629	A0 V	6.32	1.635	1.362	2.901
510	HD 23632	A1 V	7.04	1.573	1.355	2.899
540	HD 23642	A0 V	6.83	1.375	1.350	2.879
542	η Tau	B7 III	2.87	1.082	0.670	2.653
722	BS 1172	B8 V	5.45	1.065	1.203	2.736
742	HD 23763	A1 V	6.95	1.592	1.341	2.875
870	27 Tau	B8 III	3.62	0.971	1.180	2.700
878	28 Tau	B8 pec	5.09	1.150	0.529	2.579
891	HD 23872	A2 V	7.46	1.759	1.338	2.894
910	HD 23873	B9.5 V	6.57	1.098	1.340	2.852
977	BS 1183	B9 V	6.17	1.331	1.271	2.794
1003	HD 23964	A0 V	6.72	1.336	1.310	2.844
1129	HD 24076	A2 V	6.93	1.617	1.330	2.867

TABLA 11

ESTRELLAS OBSERVADAS PARA $H\beta$ ($\lambda 4861$)

BS	*	MK	V	β_{ort}	β_{cr}
1122	δ Per	B5III	2.99	1.052	2.671
1203	ζ Per	B1I _b st	2.83	0.958	2.564
1220	ϵ Per	B0.5III st	2.88	0.984	2.588
1552	η^A Ori	B2III st	3.89	1.025	2.606
1641	η Aur	B3V	3.16	1.059	2.684
1713	β Ori	B8Ia st	0.08	0.756	2.550
1781	- O ⁹⁵⁶	B2V	5.71	1.061	2.638
1791	β Tau	B7III	1.64	1.064	2.703
1903	ϵ Ori	B0Ia st	1.74	0.820	2.557
2004	κ Ori	B0Ia st	2.04	0.830	2.564
2421	γ Gem	A0IV	1.95	1.234	2.869
2491	α CMA	A1V	1.47	1.238	2.910
3165	ζ Pup	O5 _f st	2.25	0.941	2.534
3314	HR3314	A0V	3.89	1.260	2.897
3982	α Leo	B7IV st	1.36	1.057	2.723
4133	47 ρ Leo	B1I _b	3.85	0.909	2.555
4554	γ UMa	A0V	2.43	1.233	2.885
4621	δ Cen	B3 _p	2.9	0.820	2.473
5191	η UMa	B3V	1.86	1.072	2.694
5511	109Vir	A0V	3.75	1.180	2.846
5793	α CrB	A0V	2.23	1.217	2.871
6092	ζ Her	B5IV	3.89	1.022	2.702
7001	α Lyr	A0V st	0.03	1.175	2.903
7178	γ Lyr	B9III	3.25	1.075	2.754
7557	α Aql	A7IV-V	0.75	1.170	2.828
8469	λ Cep	O6 _f	5.0	0.911	2.542
8622	10 Lac	O9V	4.87	0.930	2.590

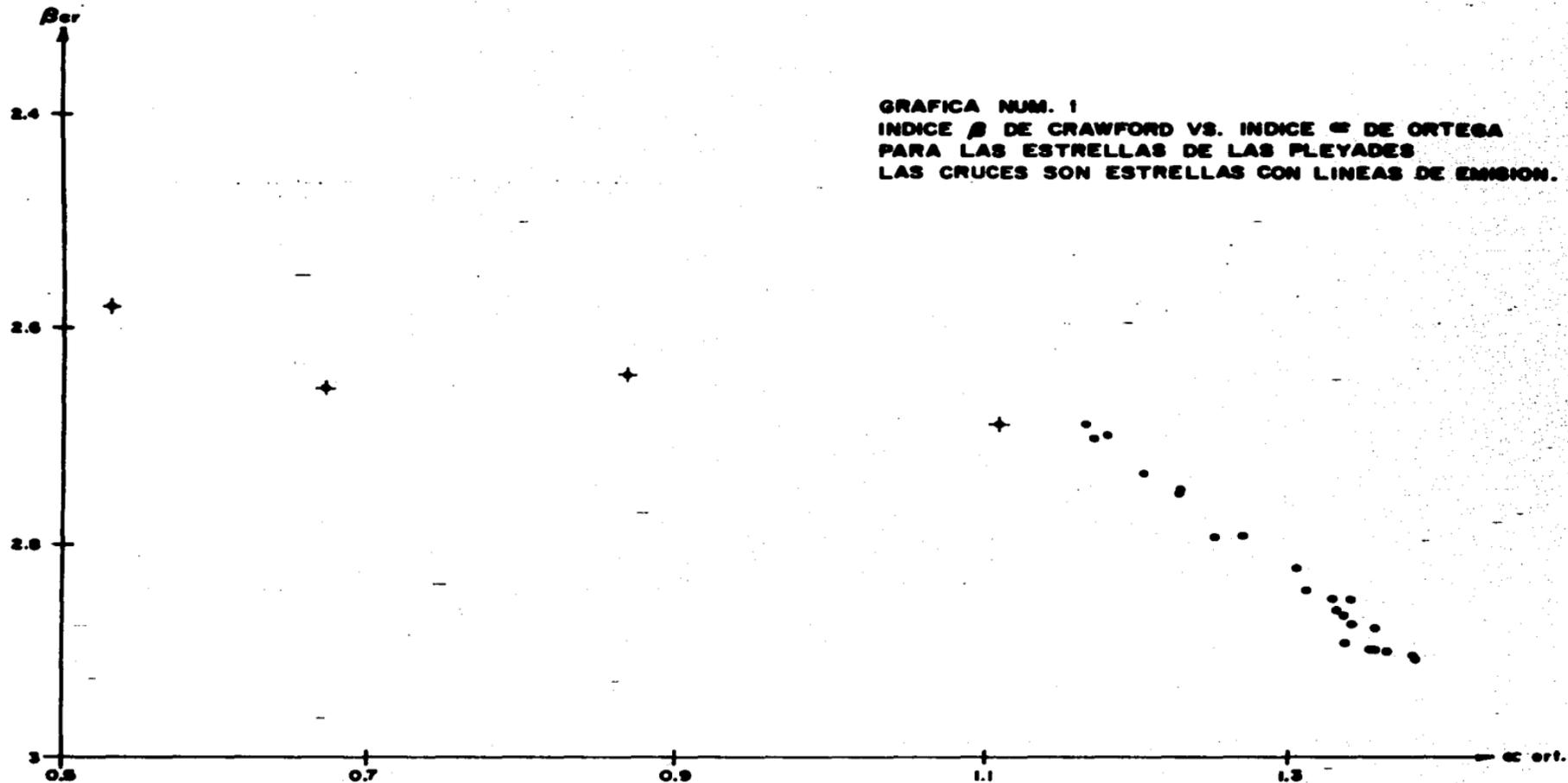
TABLA 12

ESTRELLAS OBSERVADAS

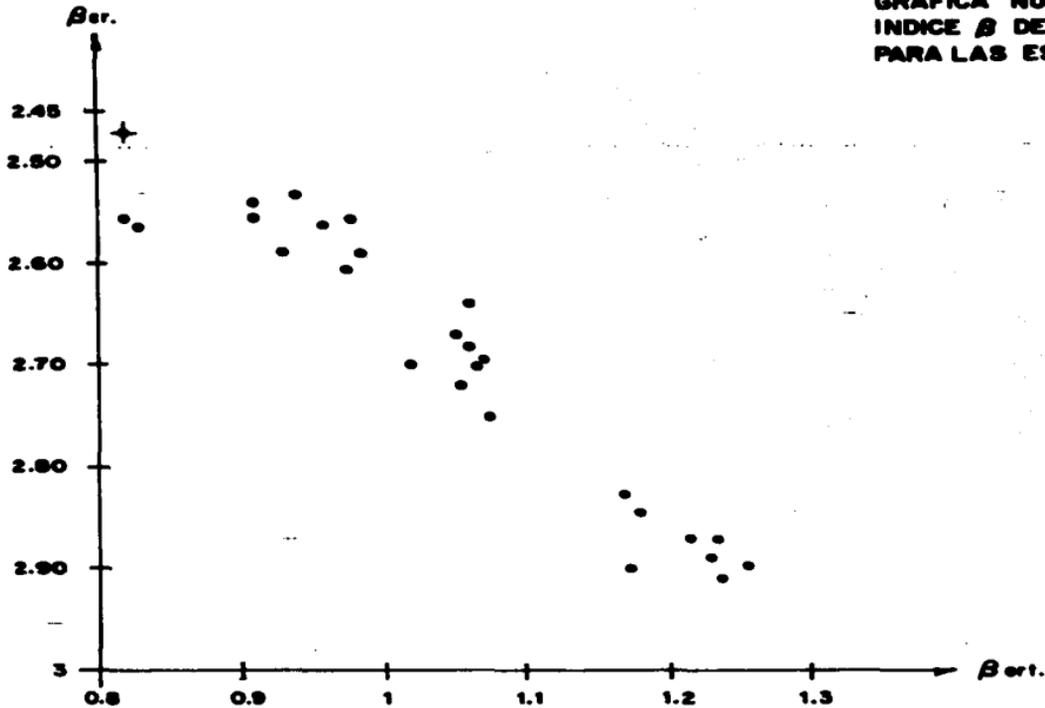
PARA H_eI (λ 5876)

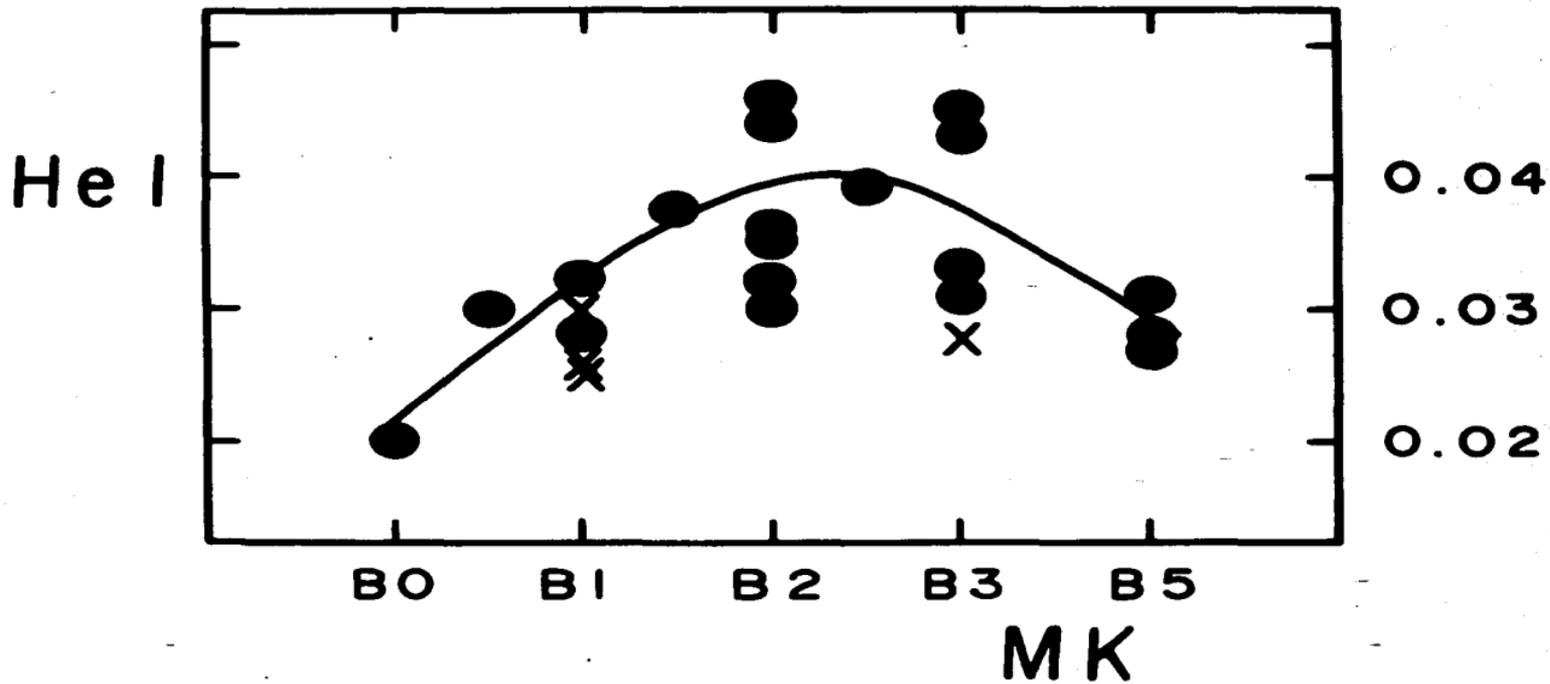
*	MK	V
ε Ori	B0 Ia	1.74
κ Ori	B0.5 Ie	2.04
γ Cas	B0 IV?e	2.65
ν Ori	B0 V	4.63
ε Per	B0.5 V	2.88
ρ Leo	B1 Ib	3.85
α Vir	B1 V	1.0
γ Ori	B2 III	1.64
π [*] Ori	B2 III	3.7
ε Cet	B2 IV	4.07
η Aur	B2 V	3.16
η UMa	B3 V	1.86
λ Tau	B3 V	3.8
μ Tau	B3 V	4.3
η Cma	B5 Ia	2.4
z Ori	B5 III	3.6
κ Hya	B5 V	5.1
19 Tau	B6 V	4.29
β Tau	B7 III	1.64
ν Tau	B7 III	2.87
α Leo	B7 V	1.36
β Ori	B8 Ia	0.08
27 Tau	B8 III	3.62

GRAFICAS

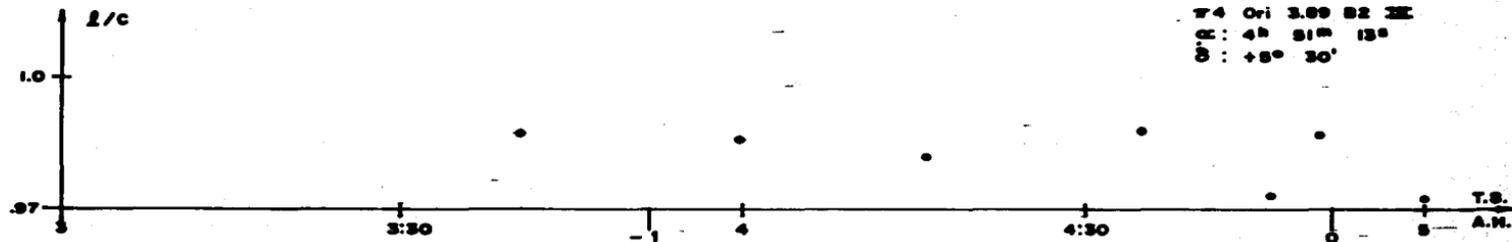
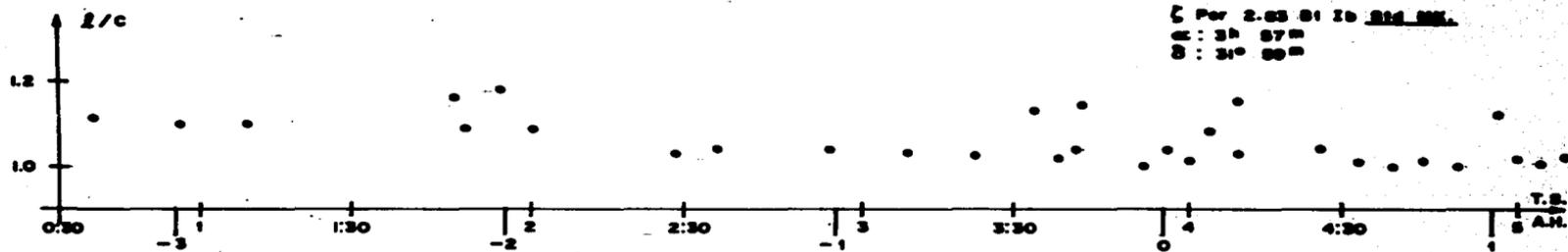
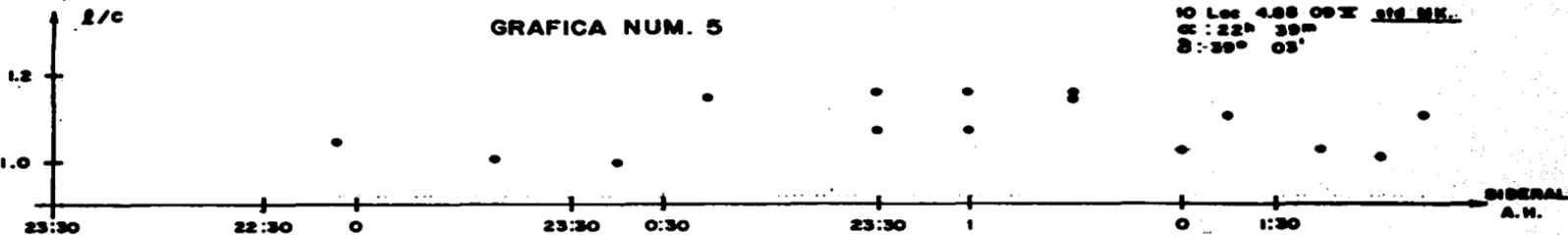


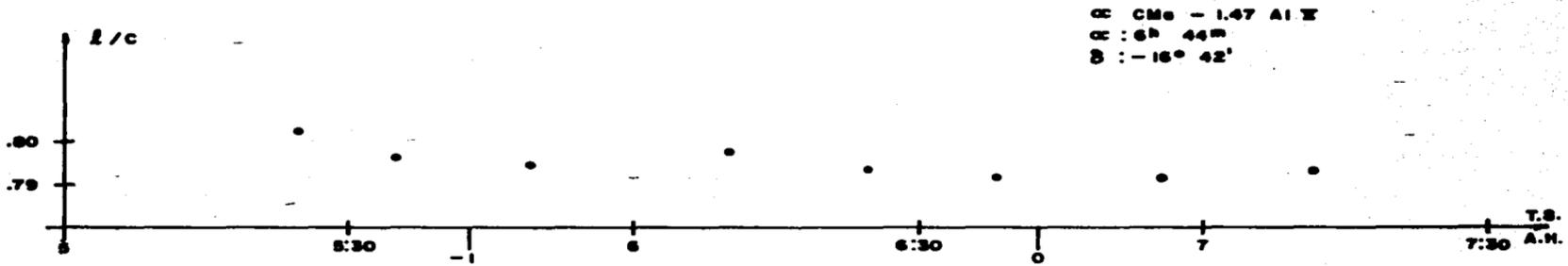
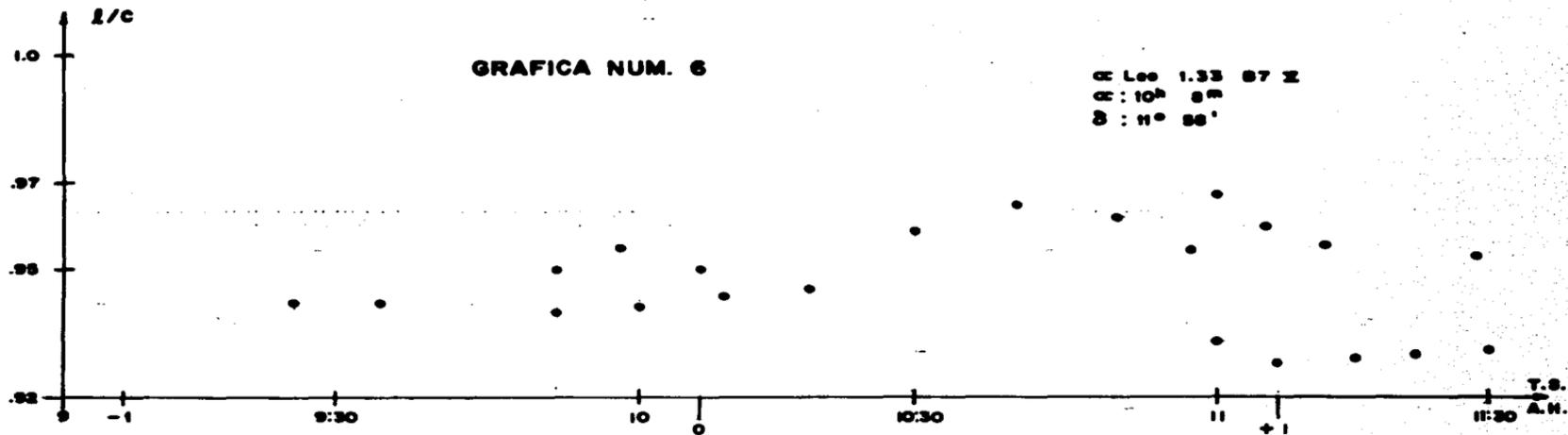
GRAFICA NUM. 2
INDICE β DE CRAWFORD VS. INDICE β DE ORTEGA
PARA LAS ESTRELLAS TIPO TEMPRANO.





GRAFICA NUM. 4 VARIACION DEL INDICE hORT DE HE I VS. TIPO ESPECTRAL





SISTEMA DE ROTACION DE REJILLAS.

Este es el sistema mecánico más complejo y preciso del instrumento que permite rotar las rejillas de difracción con gran precisión para posicionar en la rendija de salida (chopper) la longitud de onda a medir. Consiste en una caja rectangular que contiene un sistema corona-sinfin; al eje del engrane se le tiene adaptada una placa a la cual se le colocan una rejilla de cada lado. El sinfin puede ser girado con la ayuda de una flecha desde el exterior del instrumento en donde se tiene dos carátulas graduadas con vernieres indicadores de la rotación efectuada. Una carátula corresponde al eje del sinfin y la otra al eje del engrane. En el extremo del eje de la corona se tiene una flecha de 42mm de largo que sobresale al exterior del instrumento en donde tiene colocada una carátula y su vernier. Este vernier gira con el eje de la corona, puede ser referenciado a una división de la carátula, pero no produce movimiento. La carátula indica el ajuste grueso, tiene 36 divisiones, cada división es de 10° , por consiguiente una vuelta completa serán 360° . El vernier que tiene empalmado va de la división central, cinco divisiones a cada lado de $2'$ c/u; un giro en uno u otro sentido de las cinco divisiones del vernier será de $10'$ en la carátula.

Con respecto al tornillo sinfin este tiene una flecha de cold-rolled de 150mm que también sobresale del instrumento en donde tiene colocada una carátula con su vernier. Este vernier gira con la flecha sinfin, puede ser referenciado a una división de la carátula, que indica el ajuste fino y es el que produce el movimiento del engrane para lograr el giro de la rejilla de difracción. La carátula tiene 120 divisiones, cada división es de 1° , media vuelta a la carátula sera 1° . El vernier que tiene empalmado tiene desde la división central seis divisiones de 10^m c/u, un giro en uno u otro sentido de las seis divisiones del vernier será 1° en la carátula. Para cada división en 1° se tienen aproximadamente 7 \AA en el espectro de radiación. Los vernieres pueden ser posicionados en cualquier división de su carátula con el ajuste de perillas de aluminio moleteadas que se encuentran sobre cada carátula. Puesta una división de referencia con el vernier en cada carátula éstas girarán conforme gira la flecha a la posición deseada. Ver Ortega (1982) Reporte Técnico Número 4.

APENDICE B

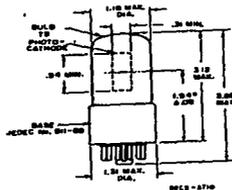
**INFORMACION TECNICA DE LOS DETECTORES Y COMPONENTES
ELECTRONICAS UTILIZADAS.**

RCA Photomultipliers

1-1/8"-Diameter Side-On Types Electrostatic-Focus, Circular-Cage Dynode Structure

Speci- fied Re- sponse	RCA Type No.	Mechanical		Electrical										Remarks		
		No. of Stages and Cage Struc- ture ^a	Dynode Sec- ondary Emit- ting Sur- face Material	Maximum Ratings		Typical Characteristics at specified operating supply voltage, voltage distribution, and 22°C						Gain (Approx.) x 10 ⁵	Anode Dark Current nA ^b		Anode Lumi- nous Sensitivity A/m	Anode Pulse Rise Time ^c ns
				Supply Vol- tage V	Average ^b Anode Current mA	Oper- ating Supply Volts and Distri- bution ^d	Sensitivity			Cathode µA/m						
				Anode A/W	Cathode mA/W	Anode A/m	Luminous ^e									
102 (S-4)	931A	9 C	Ce-Sb	1250	1.0	1000 C	80,000	40	80	40	2	5 ⊕ 20	< 2	Parent type. Popular, low- cost, general-purpose tube. Variant of 931A having guaranteed red-to-white ratio of 5% minimum. Variant of 931A having guaranteed red-to-white ratio of 7% minimum. Variant of 931A having "anti-hysteresis" design. Premium type containing high photo-sensitivity and low dark current. Variant of 1P21 having high photo-sensitivity and guar- anteed red-to-white ratio of 7% minimum. Variant of 931A having shorter overall length. Designed for AC operation. Variant of 931A having shorter overall length. Variant of 931A designed specifically for near IR systems.		
102 (S-4)	4471	9 C	Ce-Sb	1250	1.0	1000 C	100,000	40	100	40	2.5	5 ⊕ 20	< 2			
102 (S-4)	4472	9 C	Ce-Sb	1250	1.0	1000 C	100,000	40	100	40	2.5	5 ⊕ 20	< 2			
102 (S-4)	C7075J	9 C	Ce-Sb	1250	0.1	1000 C	80,000	40	80	40	2	5 ⊕ 20	< 2			
102 (S-4)	1P21	9 C	Ce-Sb	1250	0.1	1000 C	120,000	40	120	40	3	1 ⊕ 20	< 2			
102 (S-4)	4473	9 C	Ce-Sb	1250	0.1	1000 C	160,000	40	160	40	4	1 ⊕ 20	< 2			
102 (S-4)	6328	9 C	Ce-Sb	1250 Peak AC or DC	0.1	1000 C	35,000	—	35	—	—	—	< 2			
102 (S-4)	7117	9 C	Ce-Sb	1250	0.1	1000 C	35,000	—	35	—	—	—	< 2			
101 (S-1)	C31004A	9 C	Be-O	1500	0.01	1250 C	238	1.9	2.5	20	0.125	300 ⊕ 2	< 1.5			

931A
4471
4472
C7075J
1P21
4473
C31004A



* This dimension for type
C7075J is 1.99" ± 0.00".

Socket**
AM — 78511T



Magnetic Shield**
J — S-1562
M — 808018
P — 13P32V1

SND SERIES

of

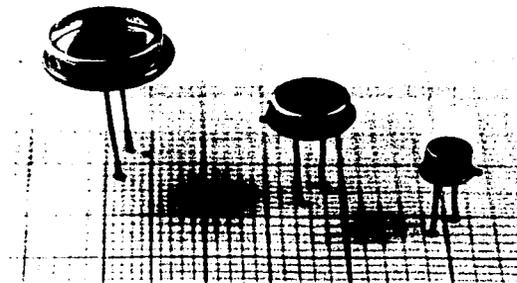
ULTRA LOW NOISE - SILICON PHOTODIODES

FEATURES:

- SPECTRAL RANGE = 350 - 1150nm
- NOISE CURRENT = 4×10^{-15} AMPS/Hz^{1/2}
- RISE TIME = 10 NANOSECONDS
- FALL TIME = 35 NANOSECONDS
- RESPONSIVITY ≥ 0.45 AMPS/WATT @ 900nm
- PLANAR DIFFUSED - NON GUARD-RING CONSTRUCTION
- NEP ($0.9\mu\text{m}$, 1MHz, 1) $\leq 9 \times 10^{-15}$ WATTS/Hz^{1/2}

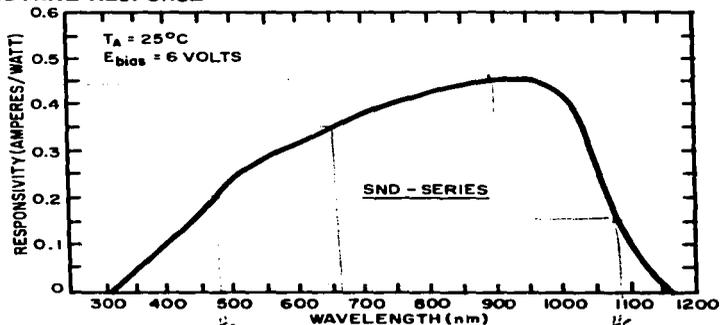
APPLICATIONS:

- CW AND PULSED LASER DETECTION
- HIGH SPEED OPTICAL ENCODERS
- ANALYTICAL INSTRUMENTS
- OPTICAL COMMUNICATIONS
- PROCESS CONTROL

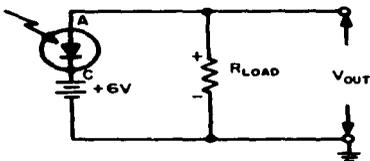

ELECTRO-OPTICAL PERFORMANCE (TYPICAL)


CHARACTERISTIC	SND-130	SND-140	SND-680	CONDITIONS OR UNITS
ACTIVE AREA	0.81	5.1	24.0	mm ²
RESPONSIVITY @ 900 nm	> 0.45	> 0.45	> 0.45	Amperes/Watt
DARK CURRENT	50	300	500	Picoamperes @ 6V
NOISE CURRENT	4	10	13	$\times 10^{-15}$ Amperes/Hz ^{1/2}
CAPACITANCE	5	35	150	Picofarads @ 6V
RISE TIME (10-90%)	8	10	12	Nanoseconds @ 6V
PULSE SPREADING	15	20	25	Nanoseconds @ 6V
FALL TIME (90-10%)	25	35	40	Nanoseconds @ 6V
BREAKDOWN VOLTAGE	> 15	> 15	> 15	Volts
NEP (900 nm, 10 MHz, 1 Hz)	< 0.9	< 2.2	< 2.8	$\times 10^{-14}$ Watts/Hz ^{1/2}
OPERATING BIAS VOLTAGE	6.0	6.0	6.0	Volts
D* (900 nm, 10 MHz, 1 Hz)	> 1.0	> 1.1	> 1.7	$\times 10^{13}$ Watts ⁻¹ -cm-Hz ^{1/2}
SERIES RESISTANCE	750	125	40	Ohms @ 6V
RESPONSE LINEARITY	± 5%	± 5%	± 5%	Over 7 Decades
OPERATING TEMPERATURE	-55 to +100	-55 to +100	-55 to +100	°C
FIELD OF VIEW	40°	140°	140°	FULL ANGLE

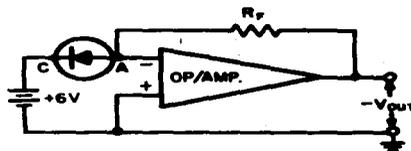
SPECTRAL RESPONSE



BASIC OPERATING CIRCUIT

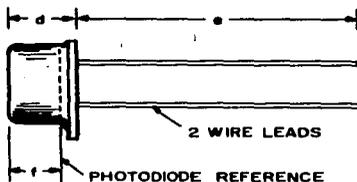


ALTERNATE OPERATING CIRCUIT

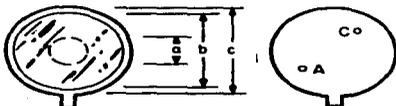


NOTE: DIODE COMMON (C) TERMINAL, INTERNALLY CONNECTED TO CASE.
A: ACTIVE TERMINAL

MECHANICAL



DIMENSION	SND-130		SND-140		SND-680	
	mm	INCH	mm	INCH	mm	INCH
a (ACTIVE AREA)	1.0	0.040	2.5	0.100	5.46	0.215
b	4.6	0.18	8.4	0.331	10.7	0.421
c	6.2	0.24	9.1	0.358	14.0	0.551
d	5.1	0.20	4.2	0.165	5.1	0.20
e	38.0	1.50	38.0	1.50	38.0	1.50
f	3.7	0.15	2.3	0.091	3.45	0.136
PIN CIRCLE RADIUS	1.3	0.052	2.5	0.098	3.78	0.149
WINDOW THICKNESS	0.9	0.035	1.3	0.052	1.30	0.052
WINDOW DIAMETER	3.5	0.138	6.1	0.240	10.7	0.421
PIN DIAMETER	0.46	0.018	0.46	0.018	0.46	0.018



SPECIAL PHOTODIODE CONFIGURATIONS

EG&G REGULARLY PROVIDES CUSTOMIZED PHOTODIODES AND PACKAGING INCLUDING PHOTODIODE/AMPLIFIER CONFIGURATIONS FOR OEM, R&D, SPACE AND MILITARY APPLICATIONS.

All Data and Specifications Subject to Change Without Notice

EG&G INC. ELECTRO - OPTICS DIVISION, 35 CONGRESS STREET, SALEM, MASS. 01870

TEL: 817-745-3200

TWX: 710-347-8741

PRINTED IN U.S.A. 2/75



VOLTAGE-TO-FREQUENCY AND FREQUENCY-TO-VOLTAGE CONVERTER

FEATURES

- RELIABLE MONOLITHIC CONSTRUCTION
- HIGH LINEARITY
 - $\pm 0.01\%$ max at 10kHz FS
 - $\pm 0.05\%$ max at 100kHz FS
 - $\pm 0.2\%$ max at 0.5MHz FS
- V/F OR F/V CONVERSION
- 6 DECADE DYNAMIC RANGE
- VOLTAGE OR CURRENT INPUT
- OUTPUT DTL/TTL/CMOS COMPATIBLE

DESCRIPTION

The VFC32 monolithic voltage-to-frequency and frequency-to-voltage converter provides a simple, low cost method of converting analog signals into an equivalent digital form. The digital output is an open collector which provides a pulse train whose repetition rate is proportional to the amplitude of the analog input voltage. Output pulses are compatible with DTL, TTL, and CMOS logic families, and have a constant width and amplitude. An external RC network sets up the full scale frequency, with guaranteed maximum nonlinearity of $\pm 0.2\%$ at 500kHz. The temperature coefficient of the full scale accuracy is ± 100 ppm/ $^{\circ}$ C maximum at 10kHz (VFC32BM) and the input offset voltage drift is only ± 3 ppm/ $^{\circ}$ C maximum.

The VFC32 is available in three models and two package configurations. The TO-100 versions are hermetically sealed, and specified for the -25 to $+85^{\circ}$ C and -55° C to $+125^{\circ}$ C ranges, and the epoxy dual-in-line unit is specified from 0 to $+70^{\circ}$ C.

THEORY OF OPERATION

The VFC32 monolithic voltage-to-frequency converter provides a digital pulse train output whose repetition rate is directly proportional to the analog input voltage. To understand the operation of the circuit, refer to Figure 1.

The input amplifier is connected in an integrator configuration. When a positive input voltage is applied at V_{in} , a constant current will flow through the input resistor, causing the voltage at f_{in} to ramp down toward zero, according to $\frac{dV}{dt} = \frac{V_{in}}{R_1 C_1}$. During this time, the constant current sink is disabled by the switch. When the ramp reaches a voltage close to zero ($\approx -0.6V$), the comparator will cause the one-shot to fire. The f_{out} signal will then change logic states, going from a "0" to a "1", and the switch will close, enabling the constant current sink. The ramp voltage will then change direction and begin to ramp up. Since V_{in}/R_1 is always set up to be less than 1mA, the current in the integrating capacitor will flow toward the summing junction, and the ramp voltage

rate of change will be $\frac{dV}{dt} = \frac{V_{in} - 1 \text{ mA}}{R_1 C_2}$. Before the ramp

voltage can saturate the input amplifier, the one-shot will reset, disabling the current sink, changing the output state back to a logic "0", and restarting the cycle. Since the integrating capacitor C_2 affects both the rising and falling segments of the ramp voltage, its tolerance and temperature coefficient do not affect the output frequency. It should, however, have a leakage current that is small compared to V_{in}/R_1 , since this parameter will add directly to the gain error of the VFC. C_1 , which controls the one-shot period, should be very precise since its tolerance and temperature coefficient add directly to the errors in the transfer function. More guidelines on the selection of the external components are given in the Operating Instructions section.

To operate the VFC32 as a highly linear frequency-to-voltage converter, open the connection between V_{out} and f_{in} , and connect V_{in} to V_{out} . The input frequency should be coupled through a capacitor to f_{in} , and a positive output voltage proportional to f_{in} will be generated at the V_{out} connection. Refer to the Operating Instructions section for more detailed information on F/V operation.

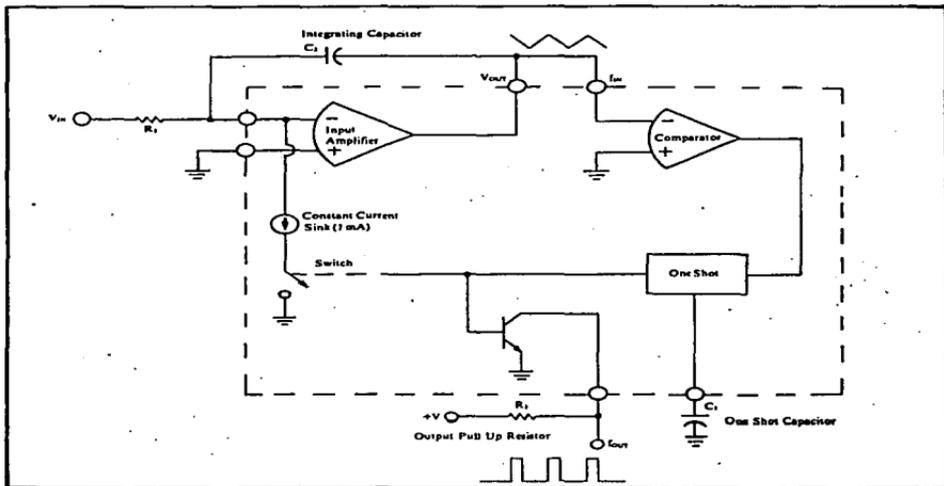


FIGURE 1. Functional Block Diagram

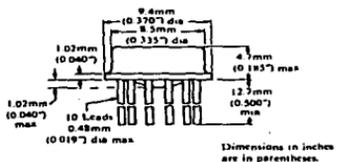
ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Specifications at $T_a = +25^\circ\text{C}$ and 2.5VDC power supply unless otherwise noted.

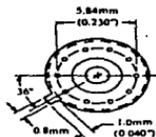
MODEL	VFC32			UNITS	MODEL	VFC32			UNITS
	MIN	TYP	MAX			MIN	TYP	MAX	
Full Scale Frequency					OUTPUT				
INPUT					Voltage Output				
Analog Input (V/F)					Voltage Range				
Voltage Range					Output Current				
Current Range					Output Impedance (closed loop)				
Input Bias Current					Capacitive Load				
inverting input					Frequency Output (open collector)				
non-inverting input					Pulse Characteristics				
Input Offset Voltage					logic "1"				
(trimmable to zero)					logic "0"				
Differential Impedance					pulse width				
(trimmable to zero)					Output Sink Current				
Common-mode Impedance					(Logic "0", 0.4V)				
Frequency Input (F/V)					Output Leakage Current				
Logic Levels					(I, logic "1")				
logic "0"					Fall Time				
logic "1"					$t_{fall} = 5 \text{ mA}, C_{load} = 500 \text{ pF}$				
Pulse Width Range,					POWER SUPPLY REQUIREMENTS				
refer to "1" in					Rated Supplies				
Figure 4)					Supply Range				
Impedance					Supply Drain (independent of				
					operating frequency)				
					TEMPERATURE RANGE				
TRANSFER CHARACTERISTICS					Specification				
Transfer Functions					VFC32K P				
$I_o = V_{in}/7.5 \text{ R}_1 \text{ C}_1$					VFC32B M				
$V_o = 7.5 \text{ R}_1 \text{ C}_1 f_{in}$					VFC32S M				
Accuracy					Operating				
Full Scale Gain Error					VFC32B M, S M				
(adjustable to zero)					Storage				
Linearity Error					VFC32B M, S M				
0.01 Hz $\leq F \leq 10$ kHz					VFC32K P				
0.1 Hz $\leq F \leq 100$ kHz					Absolute Maximum Ratings				
0.5 Hz $\leq F \leq 0.5$ MHz					Supply Voltages				
Power Supply Sensitivity					Output Sink Current (I _{max})				
Temperature Stability					Input Current (I _{max})				
Analog Input					Input Voltage, -input				
Gain Drift (f = 10 kHz)					Input Voltage, -input				
VFC32K P					Storage Temperature Range				
VFC32B M					VFC32B M, S M				
VFC32S M					VFC32K P				
Offset Drift					Supply Voltages				
VFC32K P					Output Sink Current (I _{max})				
VFC32B M					Input Current (I _{max})				
VFC32S M					Input Voltage, -input				
Frequency Input					Storage Temperature Range				
Full Scale Drift (Gain & Offset)					VFC32B M, S M				
VFC32K P					VFC32K P				
at 10 kHz)					Supply Voltages				
VFC32B M					Output Sink Current (I _{max})				
VFC32S M					Input Current (I _{max})				
Dynamic Response					Input Voltage, -input				
Settling time to within					Storage Temperature Range				
linearity specifications					VFC32B M, S M				
for a full scale input step					VFC32K P				
Overload recovery time					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				
					Input Voltage, -input				
					Storage Temperature Range				
					VFC32B M, S M				
					VFC32K P				
					Supply Voltages				
					Output Sink Current (I _{max})				
					Input Current (I _{max})				

MECHANICAL SPECIFICATIONS

VFC32BM, VFC32SM TO-100 PACKAGE



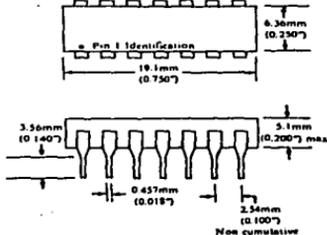
BOTTOM VIEW



Pin material and plating composition:
Conforms to MIL-Std-883, Method 2003 (solderability) except paragraph 3.2 (e.g.n).

Hermeticity:
Conforms to MIL-Std-883, Method 1014, Condition C, Step 1, Fluorocarbon (gross leak) and Condition A, Helium, 5 a 10⁻⁹ cc/sec (fine leak)
Connector: None

VFC32KP EPOXY DUAL-IN-LINE PACKAGE

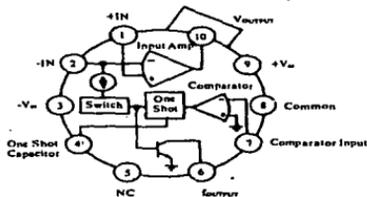


Row Spacing - 7.62mm (0.3000")
Compliant - 14 pin DIP connector (145MC)

Pin material and plating composition:
Conforms to Method 2003 (solderability) of MIL-Std-883 (except paragraph 3.2)

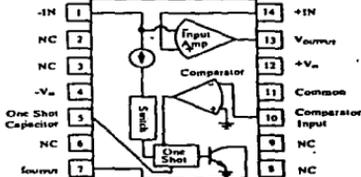
PIN CONFIGURATIONS

VFC32BM, VFC32SM TO-100 PACKAGE



TOP VIEW

VFC32KP EPOXY DUAL-IN-LINE PACKAGE



TOP VIEW

POWER SUPPLY CONSIDERATIONS

The power supply rejection ratio of the VFC32 is .02% of FSR/% max. To maintain $\pm 0.02\%$ conversion, power supplies which are stable to within $\pm 1\%$ are recommended. These supplies should be bypassed as close as possible to the converter with $0.01 \mu\text{F}$ capacitors.

FREQUENCY-TO-VOLTAGE CONVERSION

To operate the VFC32 as a frequency-to-voltage converter, connect the unit as shown in Figure 4. To interface with TTL logic, the input should be coupled through a capacitor, and the input to pin 10 biased near +2.5V. The converter will detect the falling edges of the input pulse train as the voltage at pin 10 crosses -0.6V. Choose C3 for appropriate value of t (see Figure 4). For input signals with amplitudes less than 5V, pin 10 should be biased closer to zero, to insure that the input signal at pin 10 crosses the -0.6V threshold. Errors are nulled following the procedure given on page 5-190, using 0.001X full scale frequency to null offset, and full scale frequency to null the gain error.

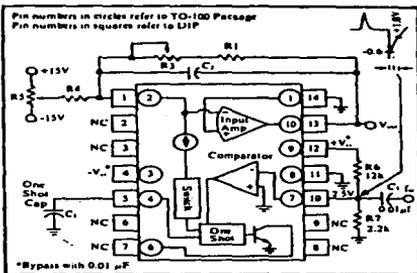


FIGURE 4. Connection Diagram for F/V Conversion

DISCUSSION OF SPECIFICATIONS

LINEARITY

Linearity is the maximum deviation of the actual transfer function from a straight line drawn between the end points (full scale input and zero input). Linearity is the true measure of a VFC's performance, and is a function of the full scale frequency. Refer to Figure 5 to determine the typical linearity errors for your application. The high linearity of the VFC32 makes the device an excellent choice for use as the front end of A/D converters with 8 to 12 bit resolution, and for highly accurate transfer of analog data over long lines in noisy environments.

FREQUENCY STABILITY vs. TEMPERATURE

Frequency stability vs. temperature is 100% tested at Burr-Brown. It is expressed as parts per million of full scale range per °C. Since the frequency drift is a function of the specified temperature range, the wide temperature models of the VFC32 are also specified over the restricted temperature ranges, as well as the extended ranges. To determine the total accuracy drift over temperature, the drift coefficients of R₁ and C₁ must be added to the drift of the converter.

RESPONSE

Response of the VFC32 to changes in input signal levels is specified for a full scale step, and is 20 microseconds plus 2 pulses of the new frequency. For 10 volt input signal steps with the VFC32 operating at 100 kHz full scale frequency, the settling time to within $\pm 0.01\%$ of full scale is 40 microseconds.

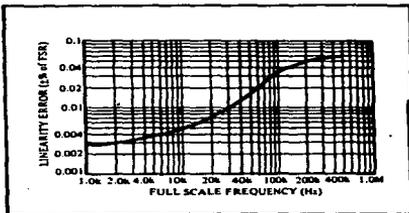


FIGURE 5. Typical Linearity Error vs Full Scale Frequency.

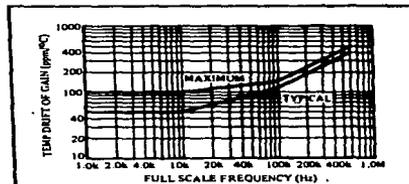


FIGURE 6. Temperature Drift of Gain vs Full Scale Frequency.

MUESTRA DEL FORMATO DE IMPRESION DE LOS DATOS.

A	B	C	L	N
00510	00510	00255	00000	1
A	B	C	L	2
00510	00765	00255	03010	
A	B	C	L	.5
00765	00510	00255	-03010	
A	B	C	L	3
00510	01020	00255	04771	
A	B	C	L	.33
01020	00510	00255	-04771	
A	B	C	L	4
00510	01275	00255	06021	
A	B	C	L	.25
01275	00510	00255	-06021	
A	B	C	L	5
00510	01530	00255	06990	
A	B	C	L	.20
01530	00510	00255	-06990	
A	B	C	L	6
00510	01785	00255	07781	
A	B	C	L	.17
01785	00510	00255	-07781	
A	B	C	L	7
00510	02040	00255	08448	

A	B	C	L	.14
02040	00510	00255	-08448	
A	B	C	L	8
00510	02295	00255	09031	
A	B	C	L	.13
02295	00510	00255	-09031	
A	B	C	L	9
00510	02550	00255	09543	
A	B	C	L	.11
02550	00510	00255	-09543	
A	B	C	L	10
00510	02805	00255	10000	
A	B	C	L	.10
02805	00510	00255	-10000	

APENDICE D

LISTADO DEL PROGRAMA SPECFOTO.

	NAM	SPECFOTO
0001		
0002	*	
0003	*CONTADOR/FRECUENCIA*	
0004	*PROGRAMA QUE GENERA UN CONTADOR Y MIDE LA	
0005	*SEÑAL QUE PROVIENE DEL CONVERTIDOR V/F DEL	
0006	*AMPLIFICADOR DEL FOTODETECTOR DE SILICIO	
0007	*	
0008 8008	① PIADRA EQU	\$8008
0009 8009	PIACRA EQU	\$8009
0010 800A	PIADRB EQU	\$800A
0011 800B	PIACRB EQU	\$800B
0012	*LISTA DE PARAMETROS*	
0013 0000 00000000	PFA FDB	0,0
0014 0004 00000000	PFB FDB	0,0
0015 0008 00000000	PFC FDB	0,0
0016 000C 00000000	RES1 FDB	0,0
0017 0010 00000000	SUS1 FDB	0,0
0018 0014 00000000	RES2 FDB	0,0
0019 0018 00000000	SUS2 FDB	0,0
0020 001C 00000000	PR0 FDB	0,0
0021 0020 00000000	NUM FDB	0,0
0022 0024 00000000	SAL FDB	0,0
0023 0028	SAVEA RMB	1
0024 0029	SAVEX RMB	2
0025 002B	SAVEX1 RMB	2
0026 A06F	STACK ORG	\$A06F
0027 A06F	RMB	1
0028	*	
0029 0228	② DATOS ORG	\$0228
0030 0228	RMB	40
0031 0250 OD	FCB	\$0D
0032 0251	NUML RMB	2
0033 0253	NUMK RMB	2
0034 0255	NUMZ RMB	2
0035	*	
0036	*VECTORES DE PRINCIPIO*	
0037 EFF8	ORG	\$EFF8
0038 EFFB E002	FDB	PRINC
0039 EFFA E002	FDB	PRINC
0040 EFFC E002	FDB	PRINC
0041 EFFE E002	FDB	PRINC
0042	*	
0043 E000	ORG	\$E000

— \$E7FB

0044 E000 10F7
 0045 E002
 0046 E002 BE A06F
 0047 E005 7F 0252
 0048 E008 7F 0251
 0049 E008 7F 0256
 0050 E00E 7F 0255
 0051 E011 7F 0254
 0052 E014 7F 0253
 0053 E017 7F 018F
 0054 E01A 86 01
 0055 E01C B7 0193
 0056 E01F 86 01
 0057 E021 B7 0194
 0058 E024 86 01
 0059 E026 B7 0195
 0060 E029 CE 0200
 0061 E02C 86 20
 0062 E02E A7 00
 0063 E030 08
 0064 E031 8C 0228
 0065 E034 26 FB
 0066 E036 86 00
 0067 E038 A7 00
 0068 E03A 86 00
 0069 E03C B7 8009
 0070 E03F B7 8008
 0071 E042 86 04
 0072 E044 B7 8009
 0073 E047 B6 8009
 0074 E04A 2C FB
 0075 E04C 86 00
 0076 E04E B7 0190
 0077 E051 B7 0191
 0078 E054 86 00
 0079 E056 B7 0192
 0080 E059 B6 8008
 0081 E05C 84 3C
 0082 E05E BA 0192
 0083 E061 B7 0192
 0084 E064 C6 01
 0085 E066 B6 0190
 0086 E069 10

ENT FDB 4343
 PRINC EQU *
 LBS #STACK
 CLR NUHL+1
 CLR NUHL
 CLR NUMZ+1
 CLR NUMZ
 CLR NUMK+1
 CLR NUMK
 CLR \$18F
 LDAA #001
 STAA \$193
 LDAA #001
 STAA \$194
 LDAA #001
 STAA \$195
 ESPACIOS LDX #0200
 LDAA #020
 LUGARES STAA ,X
 INX
 CPX #0228
 BNE LUGARES
 LDAA #00D
 STAA ,X
 LDAA #000
 STAA PIACRA
 STAA PIADRA
 LDAA #004
 STAA PIACRA
 LDAA PIACRA
 BGE INICIO
 LDAA #000
 STAA \$190
 STAA \$191
 LDAA #000
 STAA \$192
 LDAA PIADRA
 ANDA #03C
 ORAA \$192
 STAA \$192
 LDAB #001
 LDAA \$190
 SBA

(E02E)
 (4) INIPIA
 (5) INICIO
 (E047)
 (6)
 (7) CONTA

0087	E06A	B7	0190			STAA	\$190
0088	E06B	B6	0191			LDAA	\$191
0089	E070	82	00			SBCA	#\$00
0090	E072	B7	0191			STAA	\$191
0091	E075	B6	0192			LDAA	\$192
0092	E078	82	00			SBCA	#\$00
0093	E07A	B7	0192			STAA	\$192
0094	E07D	B6	8008	(E) PRUEBA		LDAA	PIADRA
0095	E080	84	80			ANDA	#\$80
0096	E082	F6	018F			LDAB	\$18F
0097	E085	B7	018F			STAA	\$18F
0098	E088	10			(9)	SBA	
0099	E089	2D	03	(E08E)		BLT	CONT1
0100	E08B	7E	E0E6			JMP	RETARD-
0101	E08E	01		CONT1		NOP	
0102	E08F	B6	8008		(10)	LDAA	PIADRA
0103	E092	84	43			ANDA	#\$43
0104	E094	16				TAB	
0105	E095	80	40			SUBA	#\$40
0106	E097	2C	03	(E09C)		BGE	CONT2
0107	E099	7E	E084			JMP	CTAB
0108	E09C	01		CONT2		NOP	
0109	E09D	8D	54	(E0F3)	(11)	BSR	RETARD1
0110	E09F	86	01			LDAA	#\$01
0111	E0A1	BB	0252			ADDA	NUML+1
0112	E0A4	B7	0252			STAA	NUML+1
0113	E0A7	86	00			LDAA	#\$00
0114	E0A9	B9	0251			ADCA	NUML
0115	E0AC	B7	0251			STAA	NUML
0116	E0AF	24	4D	(E0FE)	(12)	BCC	SALIDA
0117	E0B1	7E	E7F2			JMP	ERROR
0118	E0B4	C0	02	(13) CTAB		SUBB	#\$02
0119	E0B6	2C	03	(E0BB)		BGE	CONT3
0120	E0B8	7E	E0D1			JMP	CTAC
0121	E0BB	01		CONT3		NOP	
0122	E0BC	86	01		(14)	LDAA	#\$01
0123	E0BE	BB	0254			ADDA	NUMK+1
0124	E0C1	B7	0254			STAA	NUMK+1
0125	E0C4	86	00			LDAA	#\$00
0126	E0C6	B9	0253			ADCA	NUMK
0127	E0C9	B7	0253			STAA	NUMK
0128	E0CC	24	30	(E0FE)	(12)	BCC	SALIDA
0129	E0CE	7E	E7F2			JMP	ERROR

0130	E0D1	86 01	(15) CTAC	LDA	#01
0131	E0D3	8B 0256		ADDA	NUZ+1
0132	E0D6	B7 0256		STAA	NUMZ+1
0133	E0D9	86 00		LDA	#00
0134	E0DB	B9 0255		ADCA	NUMZ
0135	E0DE	B7 0255		STAA	NUMZ
0136	E0E1	24 18	(EOFE)	(12) BCC	SALIDA
0137	E0E3	7E E7F2		JMP	ERROR
0138	E0E6	86 01	(16) RETARD	LDA	#01
0139	E0E8	B7 0193		STAA	\$193
0140	E0EB	7A 0193		RETA	DEC \$193
0141	E0EE	26 FB	(E0EB)	BNE	RETA
0142	E0F0	7E E0FE		JMP	SALIDA
0143	E0F3	86 01	(17) RETARDI	LDA	#01
0144	E0F5	B7 0194		STAA	\$194
0145	E0F8	7A 0194		RETA1	DEC \$194
0146	E0FB	26 FB	(E0F8)	BNE	RETA1
0147	E0FD	39		RTS	
0148	E0FE	86 0190	(18) SALIDA	LDA	\$190
0149	E101	27 03	(E106)	BEQ	CONT4
0150	E103	7E E064		JMP	CONTA
0151	E106	01		CONT4	NOF
0152	E107	86 0191		LDA	\$191
0153	E10A	27 03	(E10F)	BEQ	CONT5
0154	E10C	7E E064		JMP	CONTA
0155	E10F	01		CONT5	NOF
0156	E110	86 0192		LDA	\$192
0157	E113	27 03	(E118)	BEQ	CONT6
0158	E115	7E E064		JMP	CONTA
0159	E118	01		CONT6	NOF
0160	E119	CE 0110		LDX	#0110
0161	E11C	7E E11F		JMP	ENLACE
0162					
0163					
0164					
0165					
0166					
0167	E11F	8D E22E	(19) ENLACE	JSR	FLOAT
0168	E122	0251		FDB	NUML
0169	E124	0000		FDB	PFA
0170	E126	8D E22E		JSR	FLOAT
0171	E129	0255		FDB	NUMZ
0172	E12B	0008		FDB	PFC

*

E N L A C E

*SUBROUTINA DE ENLACE PARA LOS NUMEROS DEL CONTADO

*L,K,Z CON LAS OPERACIONES DE RESTA, DIV Y LOG.

*

0173	E12D	BD	E2D1	SUB1	JSR	FPSUB
0174	E130	0000			FDB	PFA
0175	E132	0008			FDB	PFC
0176	E134	000C			FDB	RES1
0177	E136	BD	E22E		JSR	FLOAT
0178	E139	0253			FDB	NUMK
0179	E13B	0004			FDB	PFB
0180	E13D	BD	E2D1	SUB2	JSR	FPSUB
0181	E140	0004			FDB	PFB
0182	E142	0008			FDB	PFC
0183	E144	0014			FDB	RES2
0184	E146	BD	E1BF	COMPRA	JSR	FIX
0185	E149	000C			FDB	RES1
0186	E14B	0010			FDB	SUS1
0187	E14D	BD	E1BF		JSR	FIX
0188	E15FFDB		RES2			
0189	E152	0018			FDB	SUS2
0190	E154	DE	18		LDX	SUS2
0191	E156	9C	10		CPX	SUS1
0192	E158	2325	54	(E1AE)	BLS BLD	DIV2
0193	E15A	BD	E2D5	DIV1	JSR	FPDIV
0194	E15D	000C			FDB	RES1
0195	E15F	0014			FDB	RES2
0196	E161	0080			FDB	ARG
0197	E163	BD	E22E	LOG	JSR	FLOAT
0198	E166	E000			FDB	ENT
0199	E168	001C			FDB	PRO
0200	E16A	BD	E698		JSR	LOGNAT
0201	E16D	BD	E2D3		JSR	FLOPT+4
0202	E170	008C			FDB	ARG+12
0203	E172	001C			FDB	PRO
0204	E174	0020			FDB	NUM
0205	E176	BD	E1BF		JSR	FIX
0206	E179	0020			FDB	NUM
0207	E17B	0024			FDB	SAL
0208	E17D	96	24		LDAA	SAL
0209	E17F	D6	25		LDAB	SAL+1
0210	E181	CE	021E		LDX	#021E
0211	E184	BD	E295		JSR	CVBTD
0212	E187	B6	0251		LDAA	NUML
0213	E18A	F6	0252		LDAB	NUML+1
0214	E18D	CE	0200		LIX	#0200
0215	E190	BD	E295		JSR	CVBTD

0216 E193 B6 0253
 0217 E196 F6 0254
 0218 E199 CE 020A
 0219 E19C 8D E295
 0220 E19F B6 0255
 0221 E1A2 F6 0256
 0222 E1A5 CE 0214
 0223 E1A8 8D E295
 0224 E1AB 7E E78A
 0225 E1AE 8D E2D5
 0226 E1B1 0014
 0227 E1B3 000C
 0228 E1B5 0080
 0229 E1B7 86 2D
 0230 E1B9 97 021C
 0231 E1BC 7E E163

0232
 0233
 0234
 0235
 0236
 0237
 0238
 0239

0240 E1BF 30
 0241 E1C0 EE 00
 0242 E1C2 EE 00
 0243 E1C4 A6 03
 0244 E1C6 36
 0245 E1C7 A6 02
 0246 E1C9 36
 0247 E1CA A6 01
 0248 E1CC 36
 0249 E1CD 4F
 0250 E1CE 36
 0251 E1CF 36
 0252 E1D0 A6 00
 0253 E1D2 84 7F
 0254 E1D4 36
 0255 E1D5 A6 00
 0256 E1D7 36
 0257 E1D8 30
 0258

LDAA NUMK
 LDAB NUMK+1
 LDX #020A
 JSR CVBTD
 LDAA NUMZ
 LDAB NUMZ+1
 LDX #0214
 JSR CVBTD
 JMP IMPRSION
 JSR FPDIV
 FDB RES2
 FDB RES1
 FDB ARG
 LAA #02D
 STAA \$021C
 JMP LOG

DIV2

NEGAR

*

*

NAM FLOFIX

*NAM FLOATPOINT MATH ROUT

*FUNCT:TO CHANGE A FLOATING POINT VALUE

*TO INTEGER

FIX

*

FIX

TSX
 LDX 0,X
 LDX 0,X
 LDAA 3,X
 PSHA
 LDAA 2,X
 PSHA
 LDAA 1,X
 PSHA
 CLRA
 PSHA
 PSHA
 LDAA 0,X
 ANDA #07F
 PSHA
 LDAA 0,X
 PSHA
 TSX

*

0259	E1D9	01		FIX1	NOP
0260	E1DA	A6 01			LDA 1,X
0261	E1DC	84 40			ANDA #540
0262	E1DE	26 37	(E217)		BNE FIX6
0263	E1E0	A6 01			LDA 1,X
0264	E1E2	27 13	(E1F7)		BEQ FIX4
0265	E1E4	86 04			LDA #4
0266	E1E6	68 06		FIX2	ASL 6,X
0267	E1E8	69 05			ROL 5,X
0268	E1EA	69 04			ROL 4,X
0269	E1EC	69 03			ROL 3,X
0270	E1EE	69 02			ROL 2,X
0271	E1F0	4A			DECA
0272	E1F1	26 F3	(E1E6)		BNE FIX2
0273	E1F3	6A 01			DEC 1,X
0274	E1F5	20 E2	(E1D9)		BRA FIX1
0275	E1F7	01		FIX4	NOP
0276	E1F8	A6 04			LDA 4,X
0277	E1FA	2A 06	(E202)		BPL FIX5
0278	E1FC	6C 03			INC 3,X
0279	E1FE	26 02	(E202)		BNE FIX5
0280	E200	6C 02			INC 2,X
0281	E202	01		FIX5	NOP
0282	E203	A6 00			LDA 0,X
0283	E205	2A 10	(E217)		BPL FIX6
0284	E207	A6 03			LDA 3,X
0285	E209	43			COMA
0286	E20A	E6 02			LDA 2,X
0287	E20C	53			COMB
0288	E20D	A7 03			STAA 3,X
0289	E20F	E7 02			STAB 2,X
0290	E211	6C 03			INC 3,X
0291	E213	26 02	(E217)		BNE FIX6
0292	E215	6C 02			INC 2,X
0293	E217	01		FIX6	NOP
0294	E218	EE 07			LDX 7,X
0295	E21A	EE 02			LD 2,X
0296	E21C	32			PULA
0297	E21D	32			PULA
0298	E21E	32			PULA
0299	E21F	A7 00			STAA 0,X
0300	E221	32			PULA
0301	E222	A7 01			STAA 1,X

0345	E258	A8 03		EORA	3,X
0346	E25A	27 13	(E26F)	BEG	FLOAT3
0347	E25C	86 04		LDAA	#4
0348	E25E	64 02	FLOAT2	LSR	2,X
0349	E260	66 03		ROR	3,X
0350	E262	66 04		ROR	4,X
0351	E264	66 05		ROR	5,X
0352	E266	66 06		ROR	6,X
0353	E268	4A		DECA	
03E269	26 F3		(E25E)	BNE	FLOAT2
0355	E26B	6C 01		INC	1,X
0356	E26D	20 E6	(E255)	BRA	FLOAT1
0357	E26F	01	FLOAT3	NOP	
0358	E270	A6 00		LDAA	0,X
0359	E272	2A 06	(E27A)	BPL	FLOAT4
0360	E274	A6 01		LDAA	1,X
0361	E276	8A 80		ORAA	#80
0362	E278	A7 01		STAA	1,X
0363	E27A	01	FLOAT4	NOP	
0364	E27B	EE 07		LDX	7,X
0365	E27D	EE 02		LDX	2,X
0366	E27F	32		PULA	
0367	E280	32		PULA	
0368	E281	A7 00		STAA	0,X
0369	E283	32		PULA	
0370	E284	32		PULA	
0371	E285	32		PULA	
0372	E286	A7 01		STAA	1,X
0373	E288	32		PULA	
0374	E289	A7 02		STAA	2,X
0375	E28B	32		PULA	
0376	E28C	A7 03		STAA	3,X
0377	E28E	30		TSX	
0378	E28F	EE 00		LDX	0,X
0379	E291	31		INS	
0380	E292	31		INS	
0381	E293	6E 04		JMP	4,X
0382			*		
0383				NAM	CVBTD
0384			*		
0385					*CONVERT BINARY TO DECIMAL & STORE 5 CHAR
0386					*CALLING SEQUENCE
0387					*(A,B) BINARY VALUE

```

0388                                     *(X) POINTER TO STORE DECIMAL CHARS
0389                                     *JSR CVBTD CONVERT
0390                                     *TEMPORARY STORAGE
0391                                     *
0392 E295   DF 29                       CVBTD   STX   SAVEX
0393 E297   CE E2C5                      LDX   #K10K
0394 E29A   7F 002B                      CVDEC1  CLR   SAVEA
0395 E29D   E0 01                       CVDEC2  SUBB  1,X
0396 E29F   A2 00                        SBCA  0,X
0397 E2A1   25 05                        (E2A8)  BCS  CVDEC5
0398 E2A3   7C 002B                      INC   SAVEA
0399 E2A6   20 F5                        (E29D)  BRA  CVDEC2
0400 E2A8   EB 01                       CVDEC5  -ADDB 1,X
0401 E2AA   A9 00                        ADCA  0,X
0402 E2AC   36                          PSHA
0403 E2AD   DF 2B                       STX   SAVEX1
0404 E2AF   DE 29                       LDX   SAVEX
0405 E2B1   96 28                       LDAA  SAVEA
0406 E2B3   88 30                       ADDA  #*30
0407 E2B5   A7 00                       STAA  0,X
0408 E2B7   32                          PULA
0409 E2B8   08                          INX
0410 E2B9   DF 29                       STX   SAVEX
0411 E2BB   DE 2B                       LDX   SAVEX1
0412 E2BD   08                          INX
0413 E2BE   08                          INX
0414 E2BF   8C E2CF                      CPX   #K10K+10
0415 E2C2   26 D6                        (E29A)  BNE  CVDEC1
0416 E2C4   39                          RTS
0417                                     *CONSTANTS sR CONVERSION
0418 E2C5   2710                          K10K   FDB  10000
0419 E2C7   03E8                          FDB  1000
0420 E2C9   0064                          FDB  100
0421 E2CB   000A                          FDB  10
0422 E2CD   0001                          FDB  1
0423                                     *
0424                                     *NAM   FLOAT
0425                                     *SUBRUT PRECISION SIMPLE PTO.FLOTANTE*
0426 E2CF   VAR   EQU   *
0427                                     *START VECTORS
0428 E2CF   20 0D                        (E2DE) FPADD  BRA  ADDGO
0429 E2D1   20 0F                        (E2E2) FPSUB  BRA  SUBGO
0430 E2D3   20 02                        (E2D7) FPMUL  BRA  MULGO

```

0431	E2D5	20 03	(E2DA)	FPIV	BRA	DIVG0	
0432			*				
0433			*	MULTIPLY	ARG1*ARG2=RESULT		
0434			*				
0435	E2D7	5F		MULG0	CLRB		
0436	E2D8	20 0A	(E2E4)		BRA	FPARG	
0437			*				
0438			*	DIVIDE	ARG2/ARG1=RESULT		
0439			*				
0440	E2DA	C6 01		DIVG0	LDAB	#1	
0441	E2DC	20 06	(E2E4)		BRA	FPARG	
0442			*				
0443			*	ADD	ARG1+ARG2=RESULT		
0444			*				
0445	E2DE	C6 02		ADDG0	LDAB	#2	
0446	E2E0	20 02	(E2E4)		BRA	FPARG	
0447			*				
0448			*	SUB	ARG1-ARG2=RESULT		
0449			*				
0450	E2E2	C6 03		SUBG0	LDAB	#3	
0451			*				
0452			*	HERE TO GET ARGS FROM USER CALLING SEQUENCE			
0453			*	AND TO RESERVE SCRATCH ON THE STACK			
0454			*				
0455			*				
0456	E2E4	30		FPARG	TSX		
0457	E2E5	EE 00			LDX	0,X	
0458	E2E7	EE 00			LDX	0,X	
0459	E2E9	4F			CLRA		
0460	E2EA	36			PSHA		
0461	E2EB	A6 03			LDAA	3,X	
0462	E2ED	36			PSHA		
0463	E2EE	A6 02			LDAA	2,X	
0464	E2F0	36			PSHA		
0465	E2F1	A6 01			LDAA	1,X	
0466	E2F3	36			PSHA		
0467	E2F4	A6 00			LDAA	0,X	
0468	E2F6	36			PSHA		
0469	E2F7	30			TSX		
0470	E2F8	EE 05			LDX	5,X	
0471	E2FA	EE 02			LDX	2,X	
0472	E2FC	4F			CLRA		
0473	E2FD	36			PSHA		

0474	E2FE	A6	03		LDAA	3,X
0475	E300	36			PSHA	
0476	E301	A6	02		LDAA	2,X
0477	E303	36			PSHA	
0478	E304	A6	01		LDAA	1,X
0479	E306	36			PSHA	
0480	E307	A6	00		LDAA	0,X
0481	E309	36			PSHA	
0482	E30A	4F			CLRA	
0483	E30B	36			PSHA	
0484	E30C	36			PSHA	
0485	E30D	36			PSHA	
0486	E30E	36			PSHA	
0487	E30F	36			PSHA	
0488	E310	36			PSHA	
0489	E311	36			PSHA	
0490	E312	30			TSX	
0491					*FIND OUT WHAT THE CALL WAS (CODE IN B)	
0492	E313	5D			TSTB	
0493	E314	27	5E	(E374)	BEQ	MULSUB
0494	E316	C1	01		CHPB	#1
0495	E318	27	54	(E36E)	BEQ	DVSR1
0496					*MUST BE ADD OR SUB WHICH START OUT THE SAME	
0497	E31A	20	54	(E370)	BRA	ADSR1
0498					*	
0499					*HERE WHEN PROCESSING IS COMPLETED PULL RESULT	
0500					* FROM STACK AND PUT IT WHERE THE USER	
0501					* POINTED	
0502					*	
0503					*	
0504	E31C	6D	06		FPOUT	TST 6,X
0505	E31E	2A	29	(E349)	BPL	X015
0506	E320	6C	05		INC	5,X
0507	E322	26	25	(E349)	BNE	X015
0508	E324	6C	04		INC	4,X
0509	E326	26	21	(E349)	BNE	X015
0510	E328	6C	03		INC	3,X
0511	E32A	26	1D	(E349)	BNE	X015
0512	E32C	86	04		LDAA	#4
0513	E32E	0D			SEC	
0514	E32F	66	03	X014	ROR	3,X
0515	E331	66	04		ROR	4,X
0516	E333	66	05		ROR	5,X

0517	E335	66	06		ROR	6,X
0518	E337	0C			CLC	
0519	E338	4A			DECA	
0520	E339	26	F4	(E32F)	BNE	X014
0521	E33B	68	02		ASL	2,X
0522	E33D	66	00		ROR	0,X
0523	E33F	6C	02		INC	2,X
0524	E341	6C	02		INC	2,X
0525	E343	29	27	(E36C)	BVS	FPOVF1
0526	E345	69	00		ROL	0,X
0527	E347	66	02		ROR	2,X
0528	E349	31		X015	INS	
0529	E34A	33			PULB	
0530	E34B	EE	11		LDX	17,X
0531	E34D	EE	04		LDX	4,X
0532	E34F	32			PULA	
0533	E350	A7	00		STAA	0,X
0534	E352	32			PULA	
0535	E353	A7	01		STAA	1,X
0536	E355	32			PULA	
0537	E356	A7	02		STAA	2,X
0538	E358	32			PULA	
0539	E359	A7	03		STAA	3,X
0540	E35B	86	0B		LDAA	#11
0541	E35D	31		X020	INS	
0542	E35E	4A			DECA	
0543	E35F	26	FC	(E35D)	BNE	X020
0544	E361	30			TSX	
0545	E362	EE	00		LDX	0,X
0546	E364	31			INS	
0547	E365	31			INS	
0548	E366	5D			TSTB	
0549	E367	27	01	(E36A)	BEQ	X030
0550	E369	0B			SEV	
0551	E36A	6E	06	X030	JMP	6,X
0552					*PIC BRANCHES	
0553	E36C	20	73	(E3E1)	FPOVF1	BRA FPOVF
0554	E36E	20	6D	(E3DD)	DVSUB1	BRA DVSUB2
0555	E370	20	53	(E3C5)	ADSUB1	BRA ADSUB2
0556					*	
0557					*	
0558					*	
0559					*MULTIPLY ARG1*ARG2=RESULT	

0560				*			
0561				*			
0562				*			
0563	000C			ARG1	EQU	12	
0564	0007			ARG2	EQU	7	
0565	0002			RESULT	EQU	2	
0566				*			
0567	E372	20 AB	(E31C)	FPOUT2	BRA	FPOUT	
0568	E374	86 0C		MULSUB	LDAA	WARG1	
0569	E376	8D 63	(E3DB)		BSR	NORMX1	
0570	E378	86 07			LDAA	WARG2	
0571	E37A	8D 5F	(E3DB)		BSR	NORMX1	
0572				*			
0573	E37C	86 19		FPM20	LDAA	#25	
0574	E37E	A7 00			STAA	0,X	
0575	E380	5F			CLRB		
0576	E381	66 0D		FPM30	ROR	13,X	
0577	E383	66 0E			ROR	14,X	
0578	E385	66 0F			ROR	15,X	
0579	E387	6A 00			IEC	0,X	
0580	E389	27 19	(E3A4)		BEQ	FPM40	
0581	E38B	24 0E	(E39B)		BCC	FPM35	
0582	E38D	EB 0A			ADDB	10,X	
0583	E38F	A6 04			LDAA	4,X	
0584	E391	A9 09			ADCA	9,X	
0585	E393	A7 04			STAA	4,X	
0586	E395	A6 03			LDAA	3,X	
0587	E397	A9 08			ADCA	8,X	
0588	E399	A7 03			STAA	3,X	
0589	E39B	66 03		FPM35	ROR	3,X	
0590	E39D	66 04			ROR	4,X	
0591	E39F	56			RORB		
0592	E3A0	66 06			ROR	6,X	
0593	E3A2	20 0D	(E381)		BRA	FPM30	
0594				*			
0596	COMPLETE	ADD EXPONENTS		*HERE WHEN M			
0596				*			
0597	E3A4	E7 05		FPM40	STAB	5,X	
0598	E3A6	A6 0C			LDAA	12,X	
0599	E3A8	16			TAB		
0600	E3A9	EB 07			EDRB	7,X	
0601	E3AB	C4 80			ANDB	#180	
0602	E3AD	6F 00			CLR	0,X	

0603	E3AF	48			ASLA		
0604	E3B0	68	07		ASL	7,X	
0605	E3B2	AB	07		ADDA	7,X	
0606	E3B4	29	11	(E3C7)	BVS	FPM0VF	
0607	E3B6	0C			CLC		
0608	E3B7	46			RORA		
0609	E3B8	1B		FPM37	ABA		
0610	E3B9	A7	02		STAA	2,X	
0611	E3BB	86	02		LDAA	WRESULT	
0612	E3BD	8D	1C	(E3DB)	BSR	NORMX1	
0613	E3BF	6D	00		TST	0,X	
0614	E3C1	27	AF	(E372)	BEQ	FPOUT2	
0615	E3C3	6C	02		INC	2,X	
0616					*PIC BRANCHES		
0617	E3C5	20	34	(E3FB)	ADSUB2	BRA	ADDSUB
0618					*UNDER OR OVERFLOW		
0619	E3C7	2A	22	(E3EB)	FPHOVF	BPL	FPUND
0620	E3C9	36			PSHA		
0621	E3CA	A6	03		LDAA	3,X	
0622	E3CC	85	F0		BITA	WFO	
0623	E3CE	32			PULA		
0624	E3CF	26	10	(E3E1)	BNE	FPOVF	
0625	E3D1	81	80		CMPA	W80	
0626	E3D3	26	0C	(E3E1)	BNE	FPOVF	
0627	E3D5	86	3F		LDAA	W3F	
0628	E3D7	A7	00		STAA	0,X	
0629	E3D9	20	DD	(E3B8)	BRA	FPM37	
0630	E3DB	20	70	(E44D)	NORMX1	BRA	NORMX2
0631	E3DD	20	6C	(E44B)	DVSUB2	BRA	DVSUB3
0632	E3DF	20	91	(E372)	FPOUT1	BRA	FPOUT2
0633					*		
0634					*HERE ON RESULT OVERFLOW		
0635					*		
0636	E3E1	C4	80		FPOVF	ANDB	W80
0637	E3E3	CA	3F		ORAB	W3F	
0638	E3E5	86	FF		LDAA	WFF	
0639	E3E7	6C	01		INC	1,X	
0640	E3E9	20	02	(E3ED)	BRA	FPM10	
0641					*HERE ON UNDERFLOW		
0642	E3EB	5F		FPUND	CLR8		
0643	E3EC	4F			CLRA		
0644	E3ED	A7	03	FPM10	STAA	3,X	
0645	E3EF	A7	04		STAA	4,X	

0646	E3F1	A7 05		STAA	5,X
0647	E3F3	6F 06		CLR	6,X
0648	E3F5	E7 02		STAB	2,X
0649	E3F7	20 E6	(E3DF)	BRA	FPOUT1
0650	E3F9	20 B9	(E3B4)	BRA	FPM45
0651			*		
0652			*		
0653				*ADD ARG1 + ARG2 =RESULT	
0654				* SUB ARG1- ARG2 =RESULT	
0655			*		
0656	E3FB	37		ADDSUB	PSHB
0657			*		
0658				* NORMALIZE ARGS	
0659	E3FC	86 0C		LDAA	WARG1
0660	E3FE	8D 4D	(E44D)	BSR	NORMX2
0661	E400	86 07		LDAA	WARG2
0662	E402	8D 49	(E44D)	BSR	NORMX2
0663	E404	86 08		LDAA	#8
0664	E406	A7 00		STAA	0,X
0665	E408	A6 0C		LDAA	12,X
0666	E40A	48		ASLA	
0667	E40B	E6 07		LDAB	7,X
0668	E40D	58		ASLB	
0669	E40E	6A 00		FPA05	DEC 0,X
0670	E410	2D 31	(E443)	BLT	FPA25
0671	E412	11		CBA	
0672	E413	27 40	(E455)	BEG	FPA30
0673				*SHIFT ARG WITH THE SMALLER EXP RIGHT 4 BITS	
0674	E415	2E 0C	(E423)	BGT	FPA20
0675				*ARG1 IS SMALLER	
0676	E417	8D 16	(E42F)	BSR	FPAS1
0677	E419	8D 14	(E42F)	BSR	FPAS1
0678	E41B	8D 12	(E42F)	BSR	FPAS1
0679	E41D	8D 10	(E42F)	BSR	FPAS1
0680	E41F	8B 02		ADDA	#2
0681	E421	20 EB	(E40E)	BRA	FPA05
0682				*ARG2 IS SMALLER	
0683	E423	8D 14	(E439)	FPA20	BSR FPAS2
0684	E425	8D 12	(E439)	BSR	FPAS2
0685	E427	8D 10	(E439)	BSR	FPAS2
0686	E429	8D 0E	(E439)	BSR	AS2
0687	E42B	CB 02		ADDB	#2
0688	E42D	20 DF	(E40E)	BRA	FPA05

0689				*HERE TO SHIFT ARG1 1 BIT RIGHT
0690	E42F	0C		FPA51 CLC
0691	E430	66 0D		ROR 13,X
0692	E432	66 0E		ROR 14,X
0693	E434	66 0F		ROR 15,X
0694	E436	66 10		ROR 16,X
0695	E438	39		RTS
0696				*HERE TO SHIFT ARG2 1 BIT RIGHT
0697	E439	0C		FPA52 CLC
0698	E43A	66 08		ROR 8,X
0699	E43C	66 09		ROR 9,X
0700	E43E	66 0A		ROR 10,X
0701	E440	66 0B		ROR 11,X
0702	E442	39		RTS
0703	E443	11		FPA25 CBA
0704	E444	2E 0F	(E455)	BGT FPA30
0705	E446	17		TBA
0706	E447	20 0C	(E455)	BRA FPA30
0707				*PIC BRANCHES
0708	E449	20 94	(E3DF)	FPOUT3 BRA FPOUT1
0709	E44B	20 5D	(E4AA)	DVSUB3 BRA DVSUB4
0710	E44D	20 59	(E4AB)	NORMX2 B+NORMX3
0711	E44F	20 9A	(E3EB)	FPUND5 BRA FPUND
0712	E451	20 A6	(E3F9)	FPM455 BRA FPM456
0713	E453	20 BC	(E3E1)	FPOVF3 BRA FPOVF
0714				*
0715				*HERE ON EQUAL EXPONENTS
0716				*
0717	E455	A7 02		FPA30 STAA 2,X
0718	E457	8D D6	(E42F)	q5FFAS1
0719	E459	8D DE	(E439)	BSR FPAS2
0720	E45B	A6 0C		LDAA 12,X
0721	E45D	2A 04	(E463)	BPL FPA40
0722	E45F	86 0C		LDAA #ARG1
0723	E461	8D 79	(E4DC)	BSR COMX1
0724	E463	A6 07		FPA40 LDAA 7,X
0725	E465	2A 04	(E46B)	BPL FPA50
0726	E467	86 07		LDAA #ARG2
0727	E469	8D 71	(E4DC)	BSR COMX1
0728	E46B	32		FPA50 PULA
0729	E46C	81 02		CMPA #2
0730	E46E	26 6E	(E4DE)	BNE FPS10
0731				*HERE TO ADD TWO QUADRUPLE ARGS

0732	E470	A6 10			LDAA	16,X
0733	E472	AB 0B			ADDA	11,X
0734	E474	A7 06			STAA	6,X
0735				*		
0736	E476	A6 0F			LDAA	15,X
0737	E47B	A9 0A			ADCA	10,X
0738	E47A	A7 05			STAA	5,X
0739				*		
0740	E47C	A6 0E			LDAA	14,X
0741	E47E	A9 09			ADCA	9,X
0742	E480	A7 04			STAA	4,X
0743				*		
0744	E482	A6 0D			LDAA	13,X
0745	E484	A9 08			ADCA	8,X
0746						
0747	E486	2B 2B	(E4B0)	FPA55	BVC	FPA60
0748	E48B	A7 03			STAA	3,X
0749	E48A	86 04			LDAA	#4
0750	E48C	66 03			ROR	3,X
0751	E48E	20 02	(E492)		BRA	FPA58
0752	E.1v6	FPA57	ASR	3,X		
0753	E492	66 04		FPA58	ROR	4,X
0754	E494	66 05			ROR	5,X
0755	E496	66 06			ROR	6,X
0756	E49B	4A			DECA	
0757	E499	26 F5	(E490)		BNE	FPA57
0758	E49B	6C 02			INC	2,X
0759	E49D	6C 02			INC	2,X
0760	E49F	2B 11	(E4B2)		BVC	FPA61
0761	E4A1	69 03			ROL	3,X
0762	E4A3	56		FPA59	RORB	
0763	E4A4	20 AD	(E453)	FPOVF2	BRA	FPOVF3
0764						
0765	E4A6	20 A1	(E449)	FPA80	BRA	FP0UT3
0766	E4A8	20 2A	(E4D4)	NORMX3	BRA	NORMX4
0767	E4AA	20 2A	(E4D6)	DVSUB4	BRA	DVSUB5
0768	E4AC	20 A1	(E44F)	FPUND4	BRA	FPUND5
0769	E4AE	20 A1	(E451)	FPM454	BRA	FPM455
0770				*		
0771	E4B0	A7 03		FPA60	STAA	3,X
0772	E4B2	6D 03		FPA61	TST	3,X
0773	E4B4	0C			CLC	
0774	E4B5	2A 07	(E4BE)		BPL	FPA70

0775	E4B7	86 02			LDA	WRESULT
0776	E4B9	8D 21	(E4DC)		BSR	COMX1
0777	E4BB	0D			SEC	
0778	E4BC	29 E5	(E4A3)		BVS	FPA59
0779	E4BE	66 02		FPA70	ROR	2,X
0780	E4C0	69 06			RDL	6,X
0781	E4C2	69 05			RDL	5,X
0782	E4C4	69 04			RDL	4,X
0783	E4C6	69 03			RDL	3,X
0784	E4C8	A6 03			LDA	3,X
0785	E4CA	85 F0			BITA	W#F0
0786	E4CC	26 D8	(E4A6)		BNE	FPA80
0787	E4CE	86 02			LDA	WRESULT
0788	E4D0	8D 2C	(E4FE)		BSR	NORMX
0789	E4D2	20 D2	(E4A6)		BRA	FPA80
0790				*		
0791	E4D4	20 28	(E4FE)	NORMX4	BRA	NORMX
0792	E4D6	20 6F	(E547)	DVSUB5	BRA	DVSUB6
0793	E4D8	20 D2	(E4AC)	FPUND3	BRA	FPUND4
0794	E4DA	20 D2	(E4AE)	FPM453	BRA	FPM454
0795	E4DC	20 71	(E54F)	COMX1	BRA	COMX
0796				*		
0797					*HERE TO SUBTRACT TWO QUADRUPLE ARGS	
0798				*		
0799	E4DE	A6 10		FPS10	LDA	16,X
0800	E4E0	A0 08			SUBA	11,X
0801	E4E2	A7 06			STAA	6,X
0802				*		
0803	E4E4	A6 0F			LDA	15,X
0804	E4E6	A2 0A			SBCA	10,X
0805	E4E8	A7 05			STAA	5,X
0806				*		
0807	E4EA	A6 0E			LDA	14,X
0808	E4EC	A2 09			SBCA	9,X
0809	E4EE	A7 04			STAA	4,X
0810				*		
0811	E4F0	A6 0D			LDA	13,X
0812	E4F2	A2 08			SBCA	8,X
0813	E4F4	25 03	(E4F9)		BCS	FPS20
0814	E4F6	0D			SEC	
0815	E4F7	20 BD	(E486)		BRA	FPA55
0816	E4F9	0C		FP520	CLC	
0817	E4FA	20 BA	(E486)		BRA	FPA55

```

0818 E4FC 20 A6 (E4A4) FPOVF4 BRA FPOVF2
0819 *
0820 *
0821 *
0822 *
0823 *GENER NORMLIZE ROUT CALL:JSR NORMX
0824 *WHERE A CONTAINS OFFSET TO ARG FROM NORMAL X (O
0825 *ALL REGS EXCEPT X ARE DESTROYED
0826 *V IS SET UNDERFLOW WOULD OCCUR IF NBR
0827 *WERE NORMILIZE
0828 *Z IS SET IF ARG=0
0829 *
0830 *
0831 *
0832 E4FE 36 NORMX PSHA
0833 E4FF 5F CLR B
0834 E500 08 NL1 INX
0835 E501 4A DECA
0836 E502 26 FC (E500) BNE NL1
0837 *DO NORMILIZE
0838 E504 A6 01 LDAA 1,X
0839 E506 AA 02 ORAA 2,X
0840 E508 AA 03 ORAA 3,X
0841 E50A AA 04 ORAA 4,X
0842 E50C 27 33 (E541) BEQ NRHZRO
0843 E50E 68 00 ASL 0,X
0844 E510 59 ROL B
0845 E511 A6 01 NRM01 LDAA 1,X
0846 E513 85 F0 BITA #*FO
0847 E515 26 0E (E525) BNE NRNOUT
0848 E517 6A 00 DEC 0,X
0849 E519 29 06 (E521) BVS NRMOVF
0850 E51B 6A 00 DEC 0,X
0851 E51D 8D 14 (E533) BSR NRMSH4
0852 E51F 20 F0 (E511) BRA NRM01
0853 E521- 6C 00 NRM0VF INC 0,X
0854 E523 CA 04 ORAB #4
0855 E525 56 NRMOUT ROR B
0856 E526 66 00 ROR 0,X
0857 E528 32 NRMXIT PULA
0858 E529 09 NRMPL DEX
0859 E52A 4A DECA
0860 E52B 26 FC (E529) BNE NRMPL

```

0861	E52D	07			TPA	
0862	E52E	84 10			ANDA	##10
0863	E530	18			ABA	
0864	E531	06			TAP	
0865	E532	39			RTS	
0866						
0867	E533	86 04			*SUB TO SHIFT	TRIPLE BYTE LEFT 4 BITS
0868	E535	68 04			NRMSH4	LDAA #4
0869	E537	69 03			NSHLOP	ASL 4,X
0870	E539	69 02				ROL 3,X
0871	E53B	69 01				ROL 2,X
0872	E53D	4A				ROL 1,X
0873	E53E	26 F5	(E535)		DECA	
0874	E540	39			BNE	NSHLOP
0875	E541	C6 04			RTS	
0876	E543	6F 00			NRMZRO	LDAB #4
0877	E545	20 E1	(E52B)		CLR	0,X
0878					BRA	NRMXIT
0879	E547	20 4B	(E594)		*PIC BRANCHES	
0880	E549	20 8D	(E4DB)		DIVSUB6	BRA DIVSUB
0881	E54B	20 8D	(E4DA)		FPUND2	BRA FPUND3
0882	E54D	20 AD	(E4FC)		FPH452	BRA FPH453
0883					FP0VF5	BRA FP0VF4
0884					*	
0885					*	
0886					*	
0887					*GENERALIZE TWOS COMPLEMENT ROUTINE CALL:	
0888					* JSR COMX	
0889					*WHERE A CONTAINS OFFDIET TO ARG FROM PRESENT X (0-	
0890					*REGISTERS ARE LOST	
0891					*	
0892					*	
0893	E54F	16			COMX	TAB
0894	E550	08			COM10	INX
0895	E551	4A				BECA
0896	E552	26 FC	(E550)		BNE	COM10
0897	E554	07			TPA	
0898	E555	63 01			COM	1,X
0899	E557	63 02			COM	2,X
0900	E559	63 03			COM	3,X
0901	E55B	63 04			COM	4,X
0902	E55D	6C 04			INC	4,X
0903	E55F	26 0D	(E56E)		BNE	COMOUT

```

0904 E561 6C 03 INC 3,X
0905 E563 26 09 (E56E) BNE COMOUT
0906 E565 6C 02 INC 2,X
0907 E567 26 05 (E56E) BNE COMOUT
0908 E569 6C 01 INC 1,X
0909 E56B 29 13 (E580) BVS COMXX
0910 E56D 07 COMYY TPA
0911 E56E 09 COMOUT DEX
0912 E56F 5A DEC B
0913 E570 26 FC (E56E) BNE COMOUT
0914 E572 06 TAP
0915 E573 39 RTS
0916 *PIC BRANCHES
0917 E574 7E E4FC DIVSTP JMP FPOVF4
0918 E577 7E E4FE NORMX5 JMP NORMX
0919 E57A 20 D1 (E54D) FPOVF6 BRA FPOVF5
0920 E57C 20 CD (E54B) FPM451 BRA FPM452
0921 E57E 20 C9 (E549) FPUND1 BRA FPUND2
0922 *
0923 *
0924 *HERE TO SEE IF WE CAN SHIFT THIS SO WE
0925 * CAN COMPLEMENT IT
0926 E580 86 04 COMXX LDAA #4
0927 E582 0C COM22 CLC
0928 E583 66 01 ROR 1,X
0929 E585 66 02 ROR 2,X
0930 E587 66 03 RR 3,X
0931 E589 66 04 ROR 4,X
0932 E58B 4A DECA
0933 E58C 26 F4 (E582) BNE COM22
0934 E58E 6C 00 INC 0,X
0935 E590 6C 00 INC 0,X
0936 E592 20 D9 (E56D) BRA COMYY
0937 *
0938 *
0939 *
0940 * DIVIDE ARG2/ARG1=RESULT
0941 *
0942 *
0943 *
0944 *
0945 E594 86 07 DIVSUB LDAA #ARG2
0946 E596 8D DF (E577) BSR NORMX5

```

0947	E598	86	0C		
0948	E59A	8D	DB	(E577)	LDAA #ARG1
0949	E59C	29	D6	(E574)	BSR NORMX5
0950	E59E	27	D4	(E574)	BVS DIVSTP
0951					ZQ DIVSTP
0952					*FORCE ARG2 LT ARG1 SO ALGORITHM CAN WORK
0953					*MAKE DIVIDEND (ARG2) SMALLER IN FRACTION
0954	E5A0	86	05		*AND LARGER IN EXP
0955	E5A2	64	08		FPD15 LDAA #5
0956	E5A4	66	09		FPD20 LSR 8,X
0957	E5A6	66	0A		ROR 9,X
0958	E5A8	66	0B		ROR 10,X
0959	E5AA	4A			ROR 11,X
0960	E5AB	26	F5	(E5A2)	DECA
0961					BNE FPD20
0962					*DIVIDE DIVISOR FRACTION BY 2 TO
0963	E5AD	64	0D		*FACILITATE THE ALGORITHM
0964	E5AF	66	0E		LSR 13,X
0965	E5B1	66	0F		ROR 14,X
0966	E5B3	66	10		ROR 15,X
0967					ROR 16,X
0968					*
0969					*HERE TO ACTUALLY DIVIDE THE FRACTIONS
0970	E5B5	E6	0B		*
0971	E5B7	86	1D		LDA B 11,X
0972	E5B9	36			LDA A #29
0973	E5BA	58		FPD40	PSHA
0974	E5BB	69	0A		ASLB
0975	E5BD	69	09		ROL 10,X
0976	E5BF	69	08		ROL 9,X
0977	E5C1	68	06		ROL 8,X
0978	E5C3	69	05		ASL 6,X
0979	E5C5	69	04		ROL 5,X
0980	E5C7	69	03		ROL 4,X
0981					ROL 3,X
0982					*DO A DBL SUBTRACT. IF THE RESULT IS POS SET
0983					*BIT IN RESULT. IF NEG ADD DIVISOR BACK
0984	E5C9	E0	10		*AND SET RESULT BIT=0
0985					SUBB 16,X
0986	E5CB	A6	0A		*
0987	E5CD	A2	0F		LDA A 10,X
0988	E5CF	A7	0A		SBCA 15,X
0989					STAA 10,X
					*

```

0990 E5D1  A6 09          LDAA  9,X
0991 E5D3  A2 0E          SBCA  14,X
0992 E5D5  A7 09          STAA  9,X
0993
*
0994 E5D7  A6 08          LDAA  8,X
0995 E5D9  A2 0D          SBCA  13,X
0996 E5DB  A7 08          STAA  8,X
0997
*IF CARRY NOT SET,SET QUOTIENT BIT
0998
*AND CONTINUE
0999 E5DD  24 1E          (E5FD) BCC  FPD55
1000 E5DF  20 06          (E5E7) BRA  FPD50
1001
*PIC BRANCHES
1002 E5E1  20 9B          (E57E) FPUND0 BRA  FPUND1
1003 E5E3  20 97          (E57C) FPM450 BRA  FPM451
1004 E5E5  20 93          (E57A) FPQVF7 BRA  FPQVF6
1005
*IF CARRYIS SET ADD DIVISOR BACK
1006
* AND CONTINUE
1007 E5E7  EB 10          FPD50  ADDB  16,X
1008
*
1009 E5E9  A6 0A          LDAA  10,X
1010 E5EB  A9 0F          ADCA  15,X
1011 E5ED  A7 0A          STAA  10,X
1012
*
1013 E5EF  A6 09          LDAA  9,X
1014 E5F1  A9 0E          ADCA  14,X
1015 E5F3  A7 09          STAA  9,X
1016
*
1017 E5F5  A6 08          LDAA  8,X
1018 E5F7  A9 0D          ADCA  13,X
1019 E5F9  A7 08          STAA  8,X
1020 E5FB  20 02          (E5FF) BRA  FPD60
1021
*
1022
*HERE TO SET BIT IN QUOTIENT
1023
*
1024 E5FD  6C 06          FPD55  INC   6,X
1025
*
1026 E5FF  32          FPD60  PULA
1027 E600  4A          DECA
1028 E601  26 B6          (E5B9) BNE  FPD40
1029
*LEFT JUSTIFY RESULT
1030
*SINCE WE ONLY DIVIDED 28 TIMES WE NEED TO SHIFT
1031
*UP 4 BITS BUT SINCE WE RIGHT SHIFTED THE DIVISOR
1032
*3 IS THE MAGIC NUMBER

```

1033	E603	86 03		LDA	#3
1034	E605	68 06	FPD62	ASL	6,X
1035	E607	69 05		ROL	5,X
1036	E609	69 04		ROL	4,X
1037	E60B	69 03		ROL	3,X
1038	E60D	4A		DECA	
1039	E60E	26 F5	(E605)	BNE	FPD62
1040				*	
1041				*HERE TO SUB EXPONENTS (EXP2-EXP1)	
1042				*ALSO CALCULATE SIGN AND ADJUST EXP	
1043				*TO REFLECT ORIGINAL SHIFT OF THE	
1044				*DIVIDEND	
1045				*	
1046	E610	A6 07		LDA	7,X
1047	E612	16		TAB	
1048	E613	EB 0C		EOR	12,X
1049	E615	C4 80		ANDB	#80
1050	E617	6F 00		CLR	0,X
1051	E619	4B		ASLA	
1052	E61A	6B 0C		ASL	12,X
1053	E61C	A0 0C		SUBA	12,X
1054	E61E	2B 04	(E624)	BVC	FPD70
1055	E620	2A 06	(E62B)	BPL	FPD80
1056	E622	20 C1	(E5E5)	BRA	FPDVF7
1057				*MAKE UP FOR ORIGINAL SHIFT OF ARG2 BY ADDING TO	
1058				*THE EXPONENT	
1059	E624	8B 02		FPD70	ADDA #2
1060	E626	20 BB	(E5E3)	FPD75	BRA FPM450
1061				*HERE ON POTENTIAL UNDERFLOW	
1062				*SEE IF THE ADJUST WOULD HELP ANY	
1063	E62B	8B 02		FPD80	ADDA #2
1064	E62A	29 02	(E62E)	BVS	FPD85
1065	E62C	20 B3	(E5E1)	BRA	FPUNDO
1066	E62E	0A		FPD85	CLV
1067	E62F	20 F5	(E626)	BRA	FPD75
1068				*	
1069				NAM	FUNCTN
1070				*SUBRUT PARA CALCULAR EL LOG NAT DE UN NUM*	
1071				*EN FORMATO DE P. FLOTANTE EN HEXADECIMAL*	
1072				*	
1073	0080			ARG	EQU \$80
1074	E2CF			FLOPT	EQU VAR
1075	E2CF			ADD	EQU FLOPT

1076	E2D1			SUB	EQU	FLOPT+2
1077	E2D3			MUEQU	FLOPT+4	
1078	E2D5			DIV	EQU	FLOPT+6
1079	0080			EXP	EQU	ARG
1080				*EXP (ARG)***		
1081				*ARG=4 BYTES		
1082				*HEXADEXIMAL FLOATING POINT FORMAT		
1083				*USING HEX FLOAT POINT SUBROUTS		
1084				*FORM: ARG+0=SIGN(MANT)/EXP(2^S COMPL)		
1085				*	ARG+1=A.16EXP-1 + B.16EXP-2+	
1086				*	ARG+2=C.16EXP-3+ D.16EXP-4+	
1087				*	ARG+3=E.16EXP-5 + F.16EXP-6	
1088				*RESULT IN ARG+12		
1089				*ARG IS CHANGED		
1090	E631	5F		EXPNT	CLRB	
1091	E632	96	80		LDAA	EXP
1092	E634	36			PSHA	
1093	E635	84	7F		ANDA	#17F
1094	E637	36			PSHA	
1095	E638	84	40		ANDA	#140
1096	E63A	32			PULA	
1097	E63B	27	08	(E648)	BEQ	POSEX
1098	E63D	8A	80		ORAA	#80
1099	E63F	81	FE		CMFA	#8FE
1100	E641	2F	0C	(E64F)	BLE	CALCU
1101	E643	CB	04		ADDB	#4
1102	E645	4A			DECA	
1103	E646	20	F7	(E63F)	BRA	TSTM
1104	E648	CB	04		ADDB	#4
1105	E64A	4A			DECA	
1106	E64B	2A	FB	(E648)	BPL	POSEX
1107	E64D	20	F0	(E63F)	BRA	TSTM
1108	E64F	97	80		CALCU	STAA
1109	E651	32			PULA	EXP
1110	E652	4D			TSTA	
1111	E653	2B	06	(E65B)	BMI	GOCAL
1112	E655	96	80		LDAA	EXP
1113	E657	84	7F		ANDA	#17F
1114	E659	97	80		STAA	EXP
1115	E65B	37			PSHB	
1116	E65C	8D	30	(E68E)	BSR	ADIX
1117	E65E	8D	1C	(E67C)	BSR	QUADR
1118	E660	8D	E2CF		JSR	ADD

1119	E663	008C			FDB	ARG+12
1120	E665	E779			FDB	EINS
1121	E667	008C			FDB	ARG+12
1122	E669	CE 00B0			LDX	WARG
1123	E66C	64 0D			LSR	13,X
1124	E66E	66 0E			ROR	14,X
1125	E670	66 0F			ROR	15,X
1126	E672	33		DEFLA	PULB	
1127	E673	5A			DECB	
1128	E674	2A 01	(E677)		BPL	DFLW
1129	E676	39			RTS	
1130	E677	37		DFLW	PSHB	
1131	E678	8D 02	(E67C)		BSR	QUADR
1132	E67A	20 F6	(E672)		BRA	DEFLA
1133	E67C	DE 8C		QUADR	LDX	ARG+12
1134	E67E	DF 88			STX	ARG+8
1135	E680	DE			LDX	ARG+14
1136	E682	DF 8A			STX	ARG+10
1137	E684	BD E2D3			JSR	MUL
1138	E687	008C			FDB	ARG+12
1139	E689	0088			FDB	ARG+8
1140	E68B	008C			FDB	ARG+12
1141	E68D	39			RTS	
1142	E68E	BD E2CF		ADIX	JSR	ADD
1143	E691	0080			FDB	ARG
1144	E693	E779			FDB	EINS
1145	E695	008C			FDB	ARG+12
1146	E697	39			RTS	
1147				*		
1148				*LOGARITHMUS NATURALIS***		
1149				*LN (ARG)		
1150				*HEX FLOAT POINT FORM		
1151				*RESULT IN ARG+12		
1152				*MISTAKE:OVERFLOW-BIT=1! ARG UNCHANGED		
1153				*LOGNAT IS USING SUBROUTINES OF EXPNT!!!		
1154	E698	96 80		LOGNAT	LDAA	EXP
1155	E69A	2A 02	(E69E)		BPL	GDA
1156	E69C	08		MIST	SEV	
1157	E69D	39			RTS	
1158	E69E	CE 00B1		GDA	LDX	WARG+1
1159	E6A1	C6 03			LDAB	W3
1160	E6A3	6D 00		TSTON	TST	O,X
1161	E6A5	26 06	(E6AD)		BNE	GOOD

1162	E6A7	0B			INX
1163	E6A8	5A			DECB
1164	E6A9	26 F8	(E6A3)		BNE TSTON
1165	E6AB	20 EF	(E69C)		BRA MIST
1166	E6AD	CE 0080		GOOD	LDX WARG
1167	E6B0	C6 04			LDAB #4
1168	E6B2	A6 01			LDAA 1,X
1169	E6B4	84 F0			ANDA #5FO
1170	E6B6	26 1E	(E6D6)		BNE ANOTO
1171	E6B8	68 03		VIERN	ASL 3,X
1172	E6BA	69 02			ROL 2,X
1173	E6BC	69 01			ROL 1,X
1174	E6BE	5A			DECB
1175	E6BF	26 F7	(E68B)		BNE VIERN
1176	E6C1	A6 00			LDAA 0,X
1177	E6C3	27 04	(E6C9)		BEQ MEX
1178	E6C5	6A 00			DEC 0,X
1179	E6C7	20 E4	(E6AD)		BRA GOOD
1180	E6C9	86 3F		MEX	LDAA #53F
1181	E6CB	A7 00			STAA 0,X
1182	E6CD	20 DE	(E6AD)		BRA GOOD
1183	E6CF	36		TSTEX	PSHA
1184	E6D0	A6 00			LDAA 0,X
1185	E6D2	84 40			1=A #540
1186	E6D4	32			PULA
1187	E6D5	39			RTS
1188	E6D6	A6 00		ANOTO	LDAA 0,X
1189	E6D8	8D F5	(E6CF)		BSR TSTEX
1190	E6DA	27 03	(E6DF)		BEQ PLEX
1191	E6DC	8A 80			ORAA #580
1192	E6DE	40			NEGA
1193	E6DF	48		PLEX	ASLA
1194	E6E0	48			ASLA
1195	E6E1	E6 01			LDAB 1,X
1196	E6E3	8D EA	(E6CF)	WTRS	BSR TSTEX
1197	E6E5	27 03	(E6EA)		BEQ DECRE
1198	E6E7	4C			INCA
1199	E6E8	20 01	(E6EB)		BRA SHFTB
1200	E6EA	4A		DECRE	DECA
1201	E6EB	58		SHFTB	ASLB
1202	E6EC	24 F5	(E6E3)		BCC WTRS
1203	E6EE	8D DF	(E6CF)		BSR TSTEX
1204	E6F0	27 01	(E6F3)		BEQ NRDY

1205	E6F2	40			NEGA
1206	E6F3	36		NRDY	PSHA
1207	E6F4	86	80		LDAA #80
1208	E6F6	A7	05		STAA 5,X
1209	E6F8	A6	00		LDAA 0,X
1210	E6FA	A7	04		STAA 4,X
1211	E6FC	6F	06		CLR 6,X
1212	E6FE	6F	07		CLR 7,X
1213	E700	A6	01		LDAA 1,X
1214	E702	2B	05	(E709) S2EX	BMI CLCLT
1215	E704	64	05		LSR 5,X
1216	E706	48			ASLA
1217	E707	20	F9	(E702)	BRA S2EX
1218	E709	BD	E2D5		JSR DIV
1219	E70C	0084		CLCLT	FDB ARG+4
1220	E70E	0080			FDB ARG
1221	E710	0080			FDB ARG
1222	E712	BD	E2D1		JSR SUB
1223	E715	0080			FDB ARG
1224	E717	E779			FDB EINS
1225	E719	0084			FDB ARG+4
→ 1226	E71B	BD	E68E		JSR ADIX
1227	E71E	BD	E2D5		JSR DIV
1228	E721	008C			FDB ARG+12
1229	E723	0084			FDB ARG+4
1230	E725	008C			FDB ARG+12
1231	E727	BE	8C		LDX ARG+12
1232	E729	DF	84		STX ARG+4
1233	E72B	DE	8E		LDX ARG+14
1234	E72D	DF	86		STX ARG+6
1235	E72F	BD	E67C		JSR QUADR
1236	E73B	BD	E2D5		JSR DIV
1237	E735	E7B1			FDB DREI
1238	E737	008C			FDB ARG+12
1239	E739	0080			FDB ARG
1240	E73B	BD	E68E		JSR ADIX
1241	E73E	BD	E2D3		JSR MUL
1242	E741	0084			FDB ARG+4
1243	E743	008C			FDB ARG+12
1244	E745	0088			FDB ARG+8
1245	E747	BD	E2D3		JSR MUL
1246	E74A	E77D			FDB ZWEI
1247	E74C	0088			FDB ARG+8

1248	E74E	0084		FDB	ARG+4
1249	E750	32		PULA	
1250	E751	CE 0080		LDX	WARG
1251	E754	4D		TSTA	
1252	E755	2B 04	(E75B)	BNI	NMIN
1253	E757	C6 02		LDAB	#2
1254	E759	20 03	(E75E)	BRA	COMM
1255	E75B	40		NEGA	
1256	E75C	C6 82	NMIN	LDAB	##82
1257	E75E	E7 00		STAB	0,X
1258	E760	A7 01	COMM	STAA	1,X
1259	E762	6F 02		CLR	2,X
1260	E764	6F 03		CLR	3,X
1261	E766	BD E2D3		JSR	MUL
1262	E769	0080		FDB	ARG
1263	E76B	E785		FDB	LN2
1264	E76D	008C		FDB	ARG+12
1265	E76F	BD E2CF		JSR	ADD
1266	E772	0084		FDB	ARG+4
1267	E774	008C		FDB	ARG+12
1268	E776	008C		FDB	ARG+12
1269	E778	39		RTS	
1270	E779	01100000	EINS	FDB	\$110,0
1271	E77D	01200000	ZWEI	FDB	\$120,0
1272	E781	01300000	DREI	FDB	\$130,0
1273	E785	00B17200	LN2	FDB	##81,\$7200
1274	E789	39		RTS	
1275					
1276					
1277					
1278					
1279					
1280					
1281					
1282					
1283	E78A	CE 800A			
1284	E78D	C6 FF	(20) IMPRSION	LDX	#PIARDB
1285	E78F	E7 00	INIPIB	LDAB	##FF
1286	E791	C6 3C		STAB	0,X
1287	E793	E7 01		LDAB	##3C
1288	E795	86 0D		STAB	1,X
1289	E797	-BD 02	(E79B)	LDAA	#0D
1290	E799	20 16	(E7B1)	BSR	OUTCAR
				BRA	LETRAS

*

F O R M A T O

*PROGRAMA DE IMPRESION DE LAS LETRAS A,B,C,L

*Y DE LOS NUMEROS CORRESPONDIENTES A LOS

*VALORES DE LINEA(A),CONTINUO(B),CERO(C) Y

*LOG(L).ESTE PROGRAMA DE IMPRESION ESTA EN

*CODIGO ASCII PARA LA IMPRESORA TRENDCOM 100.

*

1291	E79B	B7 800A		OUTCAR	STAA	PIADRB
1292	E79E	C6 34			LDAB	##34
1293	E7A0	F7 800B			STAB	PIACRB
1294	E7A3	C6 3C			LDAB	##3C
1295	E7A5	F7 800B			STAB	PIACRB
1296	E7AB	7D 800B		LOOP	TST	PIACRB
1297	E7AB	2A FB	(E7AB)		BPL	LOOP
1298	E7AD	F6 800A			LDAB	PIADRB
1299	E7B0	39			RTS	
1300	E7B1	86 41		LETRAS	LDAA	##41
1301	E7B3	8D E6	(E79B) A		BSR	OUTCAR
1302	E7B5	8D 1B	(E7CF)		BSR	ESPACIO1
1303	E7B7	86 42			LDAA	##42
1304	E7B9	8D E0	(E79B) B		BSR	OUTCAR
1305	E7BB	8D 12	(E7CF)		BSR	ESPACIO1
1306	E7BD	86 43			LDAA	##43
1307	E7BF	8D DA	(E79B) C		BSR	OUTCAR
1308	E7C1	8D 0C	(E7CF)		BSR	ESPACIO1
1309	E7C3	86 4C			LDAA	##4C
1310	E7C5	8D D4	(E79B) L		BSR	OUTCAR
1311	E7C7	8D 06	(E7CF)		BSR	ESPACIO1
1312	E7C9	86 0D			LDAA	##0D
1313	E7CB	8D CE	(E79B) CR		BSR	OUTCAR
1314	E7CD	20 0F	(E7DE)		BRA	NUMEROS
1315	E7CF	86 20		ESPACIO1	LDAA	##20
1316	E7D1	C6 0A			LDAB	##A
1317	E7D3	F7 0100			STAB	\$0100
1318	E7D6	8D C3	(E79B) REGRESA		BSR	OUTCAR
1319	E7D8	7A 0100			DEC	\$0100
1320	E7DB	26 F9	(E7D6)		BNE	REGRESA
1321	E7DD	39			RTS	
1322				*		
1323				*SUBROUTINA PARA IMPRIMIR LOS NUMEROS.		
1324				*		
1325	E7DE	CE 0200	(21)	NUMEROS	LDX	##0200
1326	E7E1	A6 00		PRINT	LDAA	,X
1327	E7E3	08			INX	
1328	E7E4	81 0B			CHPA	##0D
1329	E7E6	27 05	(E7ED)		BEQ	TERMINAR
1330	E7EB	8D B1	(E79B)		BSR	OUTCAR
1331	E7EA	7E E7E1			JMP	PRINT
1332	E7ED	8D AC	(E79B) TERMINAR		BSR	OUTCAR
1333	E7EF	7E E002	(22) 423	EL 222	JMP	PRINC

EL PROGRAMA SPECTRO FUE GRABADO
EN MEMORIA EPROM MAC1216 HASTA
LA LOCALIDAD E7EF

```

1334
1335
1336
1337 E7F2 CE 800A
1338 E7F5 C6 FF
1339 E7F7 E7 00
1340 E7F9 C6 3C
1341 E7FB E7 01
1342 E7FD 86 0D
1343 E7FF 8D 02 (E803)
1344 E801 20 16 (E819)
1345 E803 B7 800A OUTCHA
1346 E806 C6 3A
1347 E808 F7 800B
1348 E80B C6 3C
1349 E80D F7 800B
1350 E810 7D 800B LOP
1351 E813 2A FB (E810)
1352 E815 F6 800A
1353 E16&TS
1354 E819 86 45 LERROR
1355 E81B 8D E6 (E803)
1356 E81D 8D 1F (E83E) E
1357 E81F 86 52 R
1358 E821 8D E0 (E803)
1359 E823 8D 19 (E83E)
1360 E825 86 52 R1
1361 E827 8D DA (E803)
1362 E829 8D 13 (E83E)
1363 E82B 86 4F 0
1364 E82D 8D DA (E803)
1365 E82F 8D 0D (E83E)
1366 E831 86 52 R2
1367 E833 8D CE (E803)
1368 E835 8D 07 (E83E)
1369 E837 86 0D
1370 E839 8D CB (E803)
1371 E83B 7E E002
1372 E83E 86 20 ESPACIO2
1373 E840 C6 0B
1374 E842 F7 0100
1375 E845 8D BC (E803)
1376 E847 7A 0100 REGRE

```

```

*
*
*SUBROUTINA PARA IMPRIMIR "ERROR"
ERROR LDX #PIADRB
LDAB #FFF
STAB 0,X
LDAB #63C
STAB 1,X
LDAA #*0D
BSR OUTCHA
BRA LERROR
STAA PIADRB
LDAB #*34
STAB PIACRB
LDAB #*3C
STAB PIACRB
TST PIACRB
BPL LOP
LDAB PIADRB

LDA A #*45
BSR OUTCHA
ESPACIO2
LDAA #*52
BSR OUTCHA
ESPACIO2
LDAA #*4F
BSR OUTCHA
ESPACIO2
LDAA #*52
BSR OUTCHA
ESPACIO2
LDAA #*0D
BSR OUTCHA
PRINC
LDAA #*20
LDAB #*08
STAB #*0100
BSR OUTCHA
DEC #*0100

```

PAGE 33: FUNCTN

1377 E84A 26 F9
1378 E84C 39

(E845)

BNE REGRE
RTS

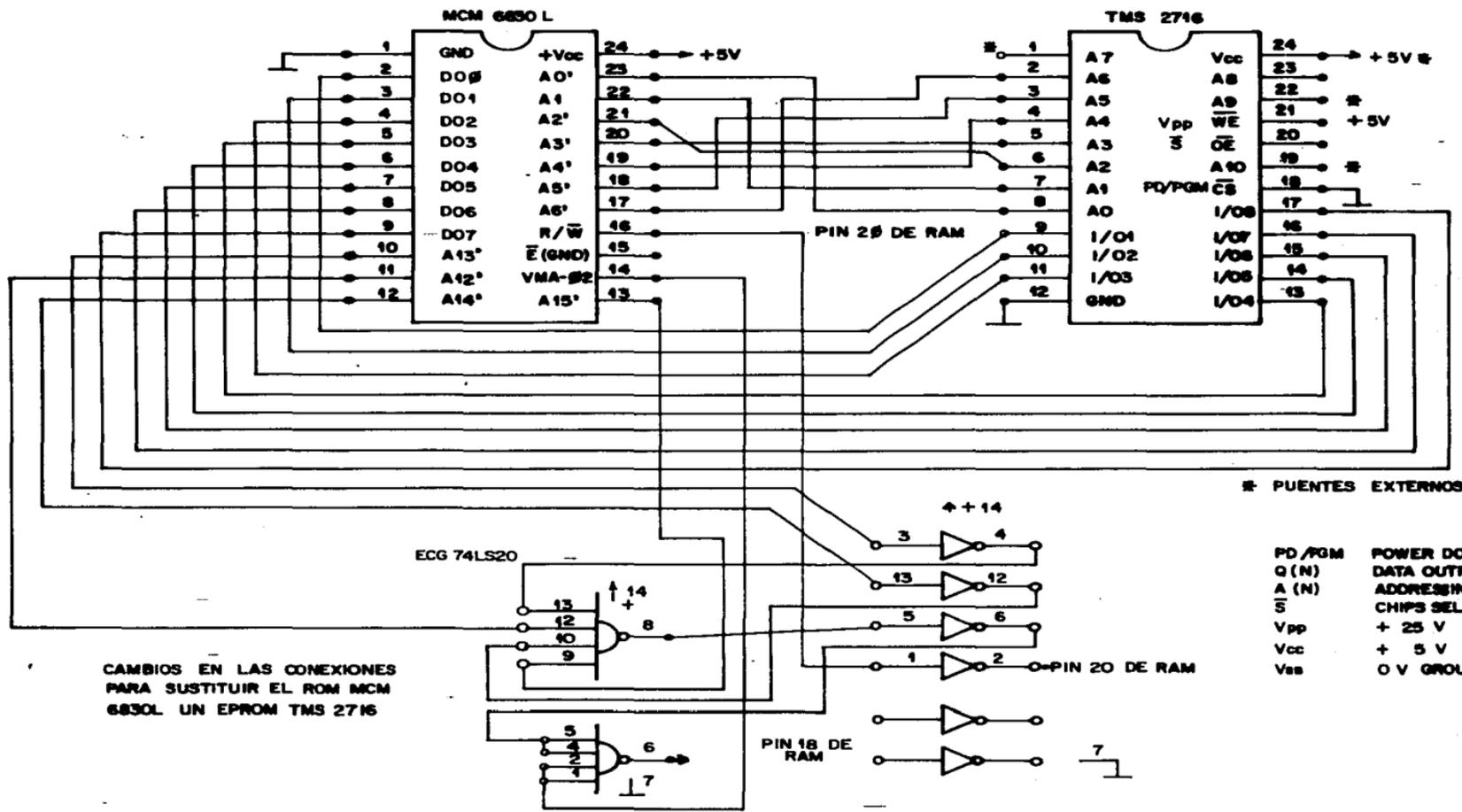
A	E7B3	ADD	E2CF	ADDG0	E2DE	ADDSUB	E3FB	ADIX	E68E
ADSUB1	E370	ADSUB2	E3C5	ANOT0	E6D6	ARG	0080	ARG1	000C
ARG2	0007	B	E7B9	C	E7BF	CALCU	E64F	CLCLT	E709
COM10	E550	COM22	E582	COMH	E75E	COMOUT	E56E	COMPRA	E146
COMX	E54F	COMX1	E4DC	COMXX	E580	COMYY	E56D	CONT1	E08E
COMT2	E09C	COMT3	E08B	COMT4	E106	CONTS	E10F	CONT6	E118
CONTA	E064	CR	E7CB	CTAB	E0B4	CTAC	E0D1	CVBITD	E295
CVDEC1	E29A	CVDEC2	E29D	CVDEC5	E2AB	DATOS	E02B	DECRE	E6EA
DEFLA	E672	DFLW	E677	DIV	E2D5	DIV1	E15A	DIV2	E1AE
DIVG0	E2DA	DIVSTP	E574	DIVSUB	E594	DRE1	E781	DVSUB1	E36E
DVSUB2	E3DD	DVSUB3	E44B	DVSUB4	E4AA	DVSUB5	E4D6	DVSUB6	E547
E	E81B	EINS	E779	ENLACE	E11F	ENT	E000	ERROR	E7F2
ESPACIO1	E7CF	ESPACIO2	E83E	ESPACIOS	E029	EXP	0080	XPNT	E631
FIX	E1BF	FIX1	E1D9	FIX2	E1E6	FIX4	E1F7	FIX5	E202
FIX6	E217	FLOAT	E22E	FLOAT1	E255	FLOAT2	E25E	FLOAT3	E26F
FLOAT4	E27A	FLOPT	E2CF	FPA05	E40E	FPA20	E423	FPA25	E443
FPA30	E455	FPA40	E463	FPA50	E46B	FPA55	E486	FPA57	E490
FPA58	E492	FPA59	E4A3	FPA60	E4B0	FPA61	E4B2	FPA70	E4BE
FPA80	E4A6	FPADD	E2CF	FPARG	E2E4	FPAS1	E42F	FPAS2	E439
FPD15	E5A0	FPD20	E5A2	FPD40	E5B9	FPD50	E5E7	FPD55	E5FD
FPD60	E5FF	FPD62	E605	FPD70	E624	FPD75	E626	FPD80	E628
FPD85	E62E	FPDIV	E2D5	FPM20	E37C	FPM30	E381	FPM35	E39B
FPM37	E3B8	FPM40	E3A4	FPM45	E3B4	FPM450	E5E3	FPM451	E57C
FPM452	E54B	FPM453	E4DA	FPM454	E4AE	FPM455	E451	FPM456	E3F9
FPMOVF	E3C7	FPMU10	E3ED	FPMUL	E2D3	FPOUT	E31C	FPOUT1	E3DF
FPOUT2	E372	FPOU13	E449	FPOVF	E3E1	FPOVF1	E36C	FPOVF2	E4A4
FPOVF3	E453	FPOVF4	E4FC	FPOVF5	E54D	FPOVF6	E57A	FPOVF7	E5E5
FP510	E4DE	FPS20	E4F9	FPSUB	E2D1	FPUND	E3E8	FPUNDO	E5E1
FPUND1	E57E	FPUND2	E549	FPUND3	E4D8	FPUND4	E4AC	FPUND5	E44F
GDA	E69E	GOCAL	E658	GOOD	E6AD	IMPRSION	E78A	INICIO	E047
-INIPIA	E03A	INIP1B	E78D	K10K	E2C5	L	E7C5	LERROR	E819
LETRAS	E7B1	LN2	E785	LOG	E163	LOGNAT	E698	LOOP	E7A8
L0P	E810	LUGARES	E02E	MEX	E6C9	MIST	E69C	MUL	E2D3
MULG0	E2D7	MULSUB	E374	NEGAR	E1B7	NLI	E500	NMIN	E75B
NORMX	E4FE	NORMX1	E3DB	NORMX2	E44D	NORMX3	E4AB	NORMX4	E4D4
NORMX5	E577	NRDY	E6F3	NRH01	E511	NRHLP	E529	NRHOUT	E525
NRMOVF	E521	NRMSH4	E533	NRHXIT	E528	NRMZRO	E541	NSHLOP	E535
NUM	0020	NUMERDS	E7DE	NUMK	0253	NUML	0251	NUMZ	0255
O	E82B	OUTCAR	E79B	OUTCHA	E803	PFA	0000	PFB	0004
PFC	000B	PIACRA	8009	PIACRB	800B	PIADRA	8008	PIADRB	800A
PLEX	E6DF	PSEX	E64B	PRINC	E002	PRINT	E7E1	PRO	001C
PRUEBA	E07D	QUADR	E67C	R	E81F	R1	E825	R2	E831
REGRE	E845	REGRESA	E7D6	RES1	000C	RES2	0014	RESULT	0002

PAGE 35: FUNCTN

RETA	EOEB	RETA1	E0F8	RETARD	EOE6	RETARD1	E0F3	S2EX	E702
SAL	0024	SALIDA	EOFE	SAVEA	0028	SAVEX	0029	SAVEX1	002B
SHFTB	E6EB	STACK	A06F	SUB	E2D1	SUB1	E12D	SUB2	E13D
SUBGO	E2E2	SUS1	0010	SUS2	0018	TERMINAR	E7ED	TSTEX	E6CF
TSTM	E63F	TSTON	E6A3	VAR	E2CF	VIERM	E6B8	UTRS	E6E3
X014	E32F	X015	E349	X020	E35D	X030	E36A	ZWEI	E77D

APENDICE E

INFORMACION TECNICA DEL EPROM Y PLANO DE CONEXIONES
AL SISTEMA MICROPROCESADOR MEK6800D1.



CAMBIOS EN LAS CONEXIONES
PARA SUSTITUIR EL ROM MCM
6830L UN EPROM TMS 2716

⊞ PUEBROS EXTERNOS

PD/PGM	POWER DOWN / PROGRAM
Q (N)	DATA OUTPUT
A (N)	ADDRESS INPUTS
S	CHIPS SELECT
Vpp	+ 25 V
Vcc	+ 5 V
Vas	0 V GROUND

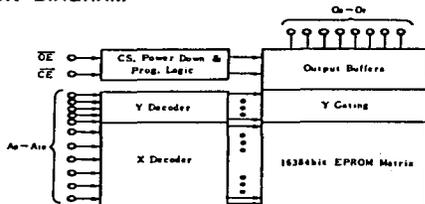
HN462716, HN462716G

ESTA TOUR NO SEBE
SALAR DE LA BIBLIOTECA

2048-word \times 8-bit U.V. Erasable and Electrically Programmable Read Only Memory
The HN462716 is a 2048 word by 8 bit erasable and electrically programmable ROMs. This device is packaged in a 24-pin, dual-in-line package with transparent lid. The transparent lid allows the user to expose the chip to ultraviolet light to erase the bit pattern, whereby a new pattern can then be written into the device.

- Single Power Supply +5V \pm 5%
- Simple Programming Program Voltage: +25V DC
Programs with One 50ms Pulse
- Static No Clocks Required
- Inputs and Outputs TTL Compatible During Both Read and Program Modes
- Fully Decoded-on Chip Address Decode
- Access Time 450ns Max.
- Low Power Dissipation 555mW Max. Active Power
161mW Max. Standby Power
- Three State Output OR- Tie Capability
- Interchangeable with Intel 2716

■ BLOCK DIAGRAM



■ PROGRAMMING OPERATION

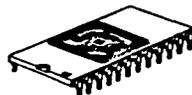
Mode	Pins	\overline{CE} (18)	\overline{OE} (20)	V_{PP} (21)	V_{CC} (24)	Outputs (9~11, 13~17)
Read		V_{IL}	V_{IL}	+5	+5	Dout
Deselect		Don't Care	V_{IH}	+5	+5	High Z
Power Down		V_{IH}	Don't Care	+5	+5	High Z
Program		Pulsed V_{IL} to V_{IH}	V_{IH}	+25	+5	Din
Program Verify		V_{IL}	V_{IL}	+25	+5	Dout
Program Inhibit		V_{IL}	V_{IH}	+25	+5	High Z

■ ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Item	Symbol	Value	Unit
Operating Temperature Range	T_{OP}	0 to +70	$^{\circ}$ C
Storage Temperature Range	T_{STG}	-65 to +125	$^{\circ}$ C
All Input and Output Voltages*	V_I	-0.3 to +7	V
V_{PP} Supply Voltage*	V_{PP}	-0.3 to +28	V

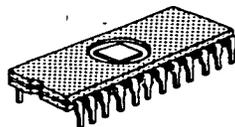
* With respect to Ground

HN462716



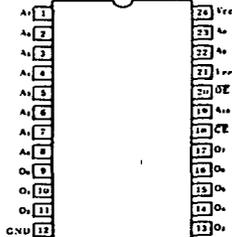
(DC-24C)

HN462716G



(DC-24B)

■ PIN ARRANGEMENT



(Top View)

ALISTADO DE DISEÑO LOGICO, S. A. 1987-71

■ READ OPERATION

● DC AND OPERATING CHARACTERISTICS ($T_a=0$ to $+70^\circ\text{C}$, $V_{CC}=5\text{V}\pm 5\%$, $V_{PP}=V_{CC}\pm 0.6\text{V}$)

Item	Symbol	Test Condition	min.	typ.	max.	Unit
Input Leakage Current	I_{IL}	$V_{IN}=5.25\text{V}$	—	—	10	μA
Output Leakage Current	I_{OL}	$V_{OUT}=5.25\text{V}/0.4\text{V}$	—	—	10	μA
V_{PP} Current	I_{PP1}	$V_{PP}=5.85\text{V}$	—	—	5	mA
V_{CC} Current (Standby)	I_{CC1}	$\overline{\text{CE}}=V_{IN}, \text{OE}=V_{IL}$	—	13	25	mA
V_{CC} Current (Active)	I_{CC2}	$\overline{\text{OE}}=\overline{\text{CE}}=V_{IL}$	—	56	100	mA
Input Low Voltage	V_{IL}		-0.1	—	0.8	V
Input High Voltage	V_{IH}		2.0	—	$V_{CC}+1$	V
Output Low Voltage	V_{OL}	$I_{OL}=2.1\text{mA}$	—	—	0.4	V
Output High Voltage	V_{OH}	$I_{OH}=-400\mu\text{A}$	2.4	—	—	V

Note: V_{IL} must be applied simultaneously or before V_{PP} and removed simultaneously or after V_{PP} .

● AC CHARACTERISTICS ($T_a=0$ to $+70^\circ\text{C}$, $V_{CC}=5\text{V}\pm 5\%$, $V_{PP}=V_{CC}\pm 0.6\text{V}$)

Parameter	Symbol	Test Condition	min.	typ.	max.	Unit
Address to Output Delay	t_{ACC}	$\overline{\text{OE}}=\overline{\text{CE}}=V_{IL}$	—	—	450	ns
$\overline{\text{CE}}$ to Output Delay	t_{CS}	$\overline{\text{OE}}=V_{IL}$	—	—	450	ns
$\overline{\text{OE}}$ to Output Delay	t_{OE}	$\overline{\text{CE}}=V_{IL}$	—	—	120	ns
$\overline{\text{OE}}$ High to Output Float*	t_{HF}	$\overline{\text{CE}}=V_{IL}$	0	—	100	ns
Address to Output Hold	t_{OH}	$\overline{\text{OE}}=\overline{\text{CE}}=V_{IL}$	0	—	—	ns

*: t_{HF} defines the time at which the output achieves the open circuit condition and is not referenced to output voltage levels.

● CAPACITANCE ($T_a=25^\circ\text{C}$, $f=1\text{MHz}$)

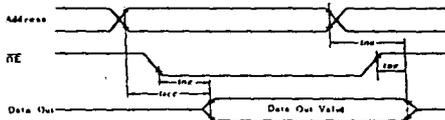
Item	Symbol	Test Condition	typ.	max.	Unit
Input Capacitance	C_{in}	$V_{IN}=0\text{V}$	—	6	pF
Output Capacitance	C_{out}	$V_{OUT}=0\text{V}$	—	12	pF

● SWITCHING CHARACTERISTICS

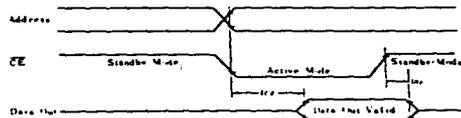
Test Conditions

Input Pulse Levels: 0.8V to 2.2V
 Input Rise and Fall Times: $\leq 20\text{ns}$
 Output Load: 1TTL Gate + 100pF
 Reference Level for Measuring Timing: Inputs 1V and 2V
 Outputs 0.8V and 2V

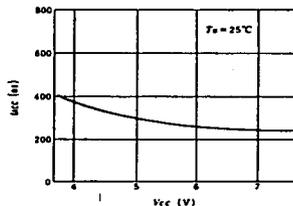
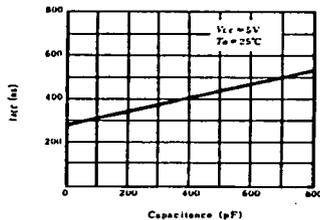
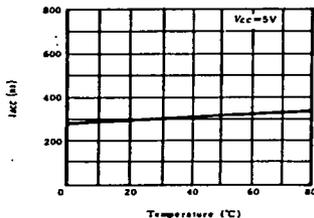
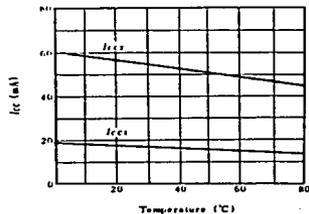
READ MODE ($\overline{\text{CE}}=V_{IL}$)



STANDBY MODE ($\overline{\text{OE}}=V_{IL}$)



● TYPICAL CHARACTERISTICS

● DC PROGRAMMING CHARACTERISTICS ($T_a = 25^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$, $V_{CC} = 5V \pm 5\%$, $V_{PP} = 25V \pm 1V$)

Parameter	Symbol	Test Condition	min.	typ.	max.	Unit
Input Leakage Current	I_{IL}	$V_{IN} = 5.25V$	—	—	10	μA
V_{PP} Supply Current	I_{PP1}	$CE = V_{IL}$	—	—	5	mA
V_{PP} Supply Current During Programming	I_{PP2}	$CE = V_{IH}$	—	—	30	mA
V_{CC} Supply Current	I_{CC}	—	—	—	100	mA
Input Low Level	V_{IL}	—	-0.1	—	0.8	V
Input High Level	V_{IH}	—	2.0	—	$V_{CC} + 1$	V

● AC PROGRAMMING CHARACTERISTICS ($T_a = 25^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$, $V_{CC} = 5V \pm 5\%$, $V_{PP} = 25V \pm 1V$)

Parameter	Symbol	Test Condition	min.	typ.	max.	Unit
Address Setup Time	t_{AS}	—	2	—	—	μs
OE Setup Time	t_{OES}	—	2	—	—	μs
Data Setup Time	t_{DS}	—	2	—	—	μs
Address Hold Time	t_{AH}	—	2	—	—	μs
OE Hold Time	t_{OEH}	—	5	—	—	μs
Data Hold Time	t_{DH}	—	2	—	—	μs
OE to Output Float Delay*	t_{OF}	$CE = V_{IL}$	0	—	120	ns
OE to Output Delay	t_{OD}	$CE = V_{IL}$	—	—	120	ns
Program Pulse Width	t_{PW}	—	45	50	55	μs
Program Pulse Rise Time	t_{PR}	—	5	—	—	ns
Program Pulse Fall Time	t_{PF}	—	5	—	—	ns

Notes: V_{CC} must be applied simultaneously or before V_{PP} and removed simultaneously or after V_{PP} .

* t_{OF} defines the time at which the output achieves the open circuit condition and is not referenced to output voltage levels.

BIBLIOGRAFIA.

1. Andriolat, Y. and Swings, J.P. (1976), *Ap. J.*, 176, 139
2. Artwick, Brace A. (1980) *Microcomputer Interfacing*. Prentice Hall, Inc.
3. Baum, W.A. (1962) *Astronomical Techniques (Stars and Stellar Systems, 2)*, 1, 1-33, (Hiltner, W.A., Ed., Univ. of Chicago Press, Chicago).
4. Bingham, R.G., (1979), *Q.J.L.R. Astr. Soc.*, 20, 395.
5. Bishop, Ron. (1979) *Basic Microprocessors And The 6800*. Hayden Book Company, Inc.
6. Bowen, I.S., (1952), *Ap.J.*, 116, 1
7. Budde, W. (1983). *Optical Radiation Measurements (Physical Detectors of Optical Radiation 4)* 5, 6, 143. Academic Press. London
8. Burton, W.M., and Reay, N.K., (1970), *Applied Optics* 9, 1227.
9. Chavarria, K.C., Johnson, H.L., (1982), *II Simposio de Instrumentación. Oaxtepec, Morelos*.
10. Chavarria, K.L. (1984) (*Comunicación privada*)
11. Code A.D. and W.C. Lillier, (1962) In *Stars and Spectrometers*, 2, 281, (Hiltner, W.A., Ed. Univ. of Chicago Press, Chicago).
12. Crawford, D.L. and Mander, J. (1965), *Astron. J.*, 71, 2, 114.
13. Deboo, G.J. Burrous, C.N., (1971) *Integrated Circuits and Semiconductors Devices*, McGraw Hill.
14. Driscoll, W.G. and Vaughan, W., Eds, (1978), *Handbook of Optics*, McGraw-Hill, N.Y.

15. De Lara, E., Chavarria, K.C., Johnson, H.L. y Moreno, R. (1977), Rev. Mex. Ast. y Astrof. 2, 2, 65.
16. Fellgett, P.B., (1969a) Optical Instruments and Techniques, (Ed. Pacini, F., Richter, W. and Wilson, R.N., 145, ESO/CERN, Genova.
17. Fuentes, M.A. (1985), Tesis Profesional, Fac. de Ciencias, UNAM.
18. Greenfield, Joseph D. and William C. Wray. (1981) Using Microprocessors and Microcomputers: The 6800 Family. John Wiley & Sons.
19. Hecht, E., Zajac, A. (1980), Optica, Fondo Educativo Interamericano, S.A.
20. Hitachi IC MEMORY DATA BOOK, (1984) 310., Japan
21. Jacquinot, P., (1954), J. Opt. Soc. Am., 44, 761.
22. Johnson, H.L. and Morgan, W.W. (1953), Ap. J., 117, 313
23. Johnson, H.L. (1958), Sky and Telescope, 17, 558.
24. Johnson, H.L. (1962), Astronomical Techniques (Photoelectric Photometry and Amplifiers, 2), 7, 157, (Hilner, W.A., Ed. Univ. of Chicago Press, Chicago).
25. Johnson, H.L. (1978). Rev. Mex. Ast. y Astrof., 4, 1, 3.
26. Johnson, H.L. (1979) (Comunicación Privada)
27. Jones, R.C., (1947), J. Opt. Soc. Am, 37, 879; 39, 327 (1949); Advan. electron., 5, 20, (1953); Phot. Sci, Tech. II, 2, 2, 56 (1955).
28. King., R. (1966), Electrical Noise, 3, Chapman and Hall, London.
29. Kotova, E.N. and Larionov, V.N. (1982), Sov. J. Opt. Technol. 46, 6, 360.
30. Lallemand, A. (1962), Astronomical Techniques (Photomultipliers, 2), 6, 126, (Hiltner, W.A.; Ed. Univ. of Chicago Press, Chicago).
31. Laustsen, S. and Reiz, A (Eds), (1972), Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes, ESO/CERN, Geneve
32. Leventhal, Lance. (1981) Assembly Language Programming. Osborne McGraw-Hill.

33. Lillier, W., (1970), *Applied Optics*, 9, 2332.
34. Malmstadt, Howard V., Christie G. Enke, Stanley R. Crouch and Gary Horlick. (1974) *Electronic Measurements for Scientists.*, W. A. Benjamin, Inc.
35. Meaburn, J. (1970), *J. Astrophys, Space Sci* 9, 206
36. Meikson, Z.H. and Thakray, P.C. (1981) *Electronic Design with Integrated Circuits of the Shelf.* 3, 103, Academic Press. London
37. Mendoza, V.E.E. (1979), *Astron, Astrophys.* 71, 147.
38. Mendoza, V.E.E. and Johnson, H.L. (1979), *Pub. Ast. Soc. Pac* 91, 465
39. Mendoza, V.E., Gómez, T., Ortega, R., Quintero, A. (1983), *Pub. Ast. Soc. Pac.* 95, 45.
40. Mendoza, V.E.E. (1977-1986) (Comunicaciones Privadas).
41. Morton, L. (1974), *Method of Experimental Physics*, 12, Part A, 433, Academic Press, N.Y.
42. M6800 Microprocessor Programming Manual. (1978) Motorola Semiconductor Products Inc. Exorciser and Exbug trademarks of Motorola Inc.
43. Motorola M6800 Microcomputer Systems Design Evaluation Kit. (1978) EXORCISER MIKBUG, MINIBUG and EXbug are trademarks of Motorola Inc.
44. Motorola Microsystems (1979), User Group Library, 1, 2.
45. Motorola M6800 Microprocessor Programming Manual (1979), Benchmark Family for Microcomputer Systems. E.E.U.U.
46. Motorola Memory Data Manual (1982), E.E.U.U.
47. Motchenbacher, C.D. and Fitchen, F.C., (1973), *Low Noise Electronic Design*, John Wiley and Sons. N.Y.
48. Ortega, M.R. (1971), Tesis Profesional, Fac. de Ciencias, UNAM.
49. Ortega, M.R. and Mendoza, V.E.E., (1979), An Infrared Spectrophotometer, Reunión 153 de la American Astronomical Society, México, D.F.
50. Ortega, M.R. (1979), Optical Design of and Infrared Spectrophotometer, Reunión Anual de la Optical Society of America, Rochester, N.Y.

51. Ortega, M.R. (1980), Amplificador de Bajo Ruido para un Detector de Silicio, XXIII Congreso Nacional de Investigación en Física, Guadalajara, Jal.
52. Ortega, R. (1982), Reporte Técnico, 4, Instituto de Astronomía, UNAM.
53. Ortega, R., (1984) Memorias del III Simposio de Instrumentación, Cd. Universitaria, México, D.F.
54. Ortega, M.R., Estévez, K.M. y Pimentel, H.J.A., (1985) Sistema de Captura, Procesamiento y Despliegue de Datos de un Espectrofotómetro Estelar, Reporte Técnico, B-126-1, Centro de Instrumentos, UNAM.
55. Pierce, J., (1956), Physical Sources of Noise, Proc. IRE, 44, 601
56. Prieu, J. and Budde, W. (1981), Applied Optics, 20, 2676.
57. RCA, (1976) Photomultiplier Tubes Catalog
58. Rieke, G.H. and Low, F.J. (1974), The Instrumentation and Techniques of Infrared Photometry, (Ed. Morton, L., Method of Experimental Physics 9), 415, Academic Press, N.Y.
59. Schoeder, D.J., (1967), Applied Optics, 6, 11, Nov.
60. Schroeder, D.J. and Anderson, C.N., (1970), Mandado a Publicar en A.J. del año.
61. Schroeder, D.J. (1974), Diffraction Grating Instruments, (Ed. Morton, L., Method of Experimental Physics 10), 463. Academic Press, N.Y.
62. Schuster, W.J. (1980) (Comunicación privada)
63. Skoog, D.A. and West, D.M. (1971), Principles of Instrumental Analysis, Holt, Rinehart and Winston Inc. N.Y.
64. Stiff, T. and Jeffers, S. (1978), Applied Optics, 17, 11, 1811.
65. Underhill, A.B. (1966), The Early Type Stars, d. Reidel Pub. Co., Holland
66. Wilcock, W.L., and Baum, W.A. (1962), Advan. Electron. 16, 383
67. Wilson, J. and Hawkes, J.F.B. (1983), Optoelectronics: And Introduction (Series Ed. Dean, P.J., International Series in Optoelectronics), Prentice-Hall, N.J.
68. Young, A.T., (1963), Applied Optics, 2, 51.