



6  
2ej.

Universidad Nacional Autónoma

---

de México

Facultad de Ciencias

DETECTOR BIDIMENSIONAL PARA OBSERVACION  
DE IMAGENES ASTRONOMICAS INFRARROJAS

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :

**FISICO**

**PRESENTA :**

SALVADOR ENRIQUE ARGÜELLES CENTENO

México D.F.

Agosto 1993.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## **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 está 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.

índice

	pág.
Introducción.	1
Capítulo 1.	10
Emisión y Absorción de Radiación.	11
Leyes de Radiación del Cuerpo Negro.	14
i) Ley de Kirchhoff.	14
ii) Ley de Stefan-Boltzman.	15
iii) Ley de Desplazamiento de Wien.	16
iv) Ley de Wien y Raleigh-Jeans.	17
v) Ley del Coseno de Lambert.	20
vi) Ley de Planck.	21
Capítulo 2.	23
Subdivisiones del Infrarrojo.	24
Transmisión de la Radiación por la Atmósfera.	28
Visible e Infrarrojo (Diferencias y Ventajas).	30
Antecedentes en los Usos del Infrarrojo.	33

Capítulo 3.	37
Parámetros Básicos de los Detectores.	37
Ruido.	40
Detectores.	45
i) Detectores Térmicos.	45
ii) Fotodetectores y Detectores Bidimensionales.	49
Capítulo 4.	55
Botella Criogénica ó Crióstato.	55
1) El Contenedor de Nitrógeno Líquido.	57
2) El Dedo Frío.	58
3) Bafle y Pupila Fríos.	59
4) Ventana Exterior.	59
5) El Carrusel de Filtros.	61
6) Trampa de Adsorción.	62
7) Tarjeta Electrónica Interior.	63
8) Manómetro (Termopar).	64

iii

Capítulo 5.	68
El "NICMOS-3" :	69
Señales de Control.	70
Señales de Alimentación.	72
Señales de Salida.	74
Lista de Terminales.	77
Capítulo 6.	81
Diagrama a Bloques del Instrumento.	81
Micro-Controlador.	82
Fuentes de Poder y Controlador del Motor de Pasos.	83
Tarjeta Exterior.	85
i) Circuitos Auxiliares.	86
ii) Cadena Analógica Digital.	92
iii) Circuito Impreso.	101
Interfaz, PC. y Estación de Trabajo.	106
Capítulo 7.	108
Resultados y Conclusiones.	108
Apéndices.	120

## Introducción

**C**omparativamente los trabajos y reportes de observaciones astronómicas en longitudes de onda infrarrojas son escasos en relación con la abundancia de éstos en otras zonas del espectro, como serían en el visible, radio-astronomía, ultravioleta o rayos-X; y sin embargo, los orígenes de la astronomía infrarroja van más allá de cuando Karl Jansky, en 1931<sup>1</sup>, descubriera radio-señales provenientes del centro de la galaxia.

Para la visión humana los límites de sensibilidad, dentro del espectro electromagnético, generalmente se establecen entre 0.400 y 0.750 $\mu$ m. Considerando las longitudes de onda vecinas mayores y menores como radiación invisible (dentro del infrarrojo para el primer caso y en el ultravioleta para el segundo). Aun cuando existen reportes que han demostrado que utilizando intensidades suficientemente altas, es posible estimular la visión fuera de estos límites ( desde aproximadamente 0.312 $\mu$ m, "Goodeve en 1934", hasta los 1.050 $\mu$ m "Griffin, Hobbard y Wald en 1947").

---

<sup>1</sup> los detectó en 1931 y fue hasta 1935 que los reportó como provenientes de la constelación de sagitario.

Si bien, el ojo no puede ver con las frecuencias propias del infrarrojo, nuestra piel es sensible a la energía que transportan<sup>2</sup>. El sistema nervioso responde a la luz visible e infrarroja de la misma forma: al absorber la radiación se experimenta una sensación de calor. A pesar de ello la sensibilidad de la piel a la radiación, en comparación con la de la visión, es escasa y además no puede discriminar sus "cualidades"; razones por las cuales no es posible realizar ningún tipo de medición precisa con la ayuda de ésta. Al encender un radiador eléctrico inmediatamente podemos comprobarlo; comenzamos por percibir su calor radiante aun antes de poderle "ver encendido", pero si continuamos calentando la resistencia podemos incluso estimar su temperatura por el color que va adquiriendo:

TABLA f.1

COLOR		Temperatura (3) aprox. °C.
rojo	incipiente	500 a 550
rojo	oscuro	700
rojo	brillante	900
rojo	amarillento	1100
blanco	incipiente	1300
blanco		1500

<sup>2</sup>En la naturaleza, sin embargo, varias familias de serpientes poseen sensores infrarrojos que les permiten localizar durante la noche a sus presas ("Bullock y Barret 1968").

<sup>3</sup>Utilizando técnicas pirométricas es posible medir con precisión temperaturas desde menos de 300 hasta algo más de 6000 °C.

En realidad cualquier cuerpo a una temperatura arriba del cero absoluto radiará energía en el infrarrojo; y aún para temperaturas de varios miles de grados<sup>4</sup> la mayor parte de ella estará dentro de esta zona. Es por ésto que se le ha denominado al infrarrojo la región del calor dentro del espectro.

El infrarrojo fue descubierto por William Herschel<sup>5</sup>, a finales del siglo XVIII, mientras buscaba filtros de colores que atenuaran el calor que llegaba a sus ojos al observar el sol. Mientras Herschel probaba diferentes filtros para proteger su vista y poder realizar observaciones solares, aunque algunos casi no transmitían luz, seguía percibiendo calor a través del filtro dependiendo de su color. Esto lo hizo suponer que los diferentes colores de la luz tendrían diferentes capacidades de calentamiento. Para comprobarlo colocó un rústico monocromador que consistía en una rendija junto con un prisma, el cual proyectaba la luz refractada sobre una mesa, y con la ayuda de termómetros de mercurio (dos de ellos utilizados para medir la temperatura ambiente y tener así alguna referencia) fue midiendo la temperatura que se registraba bajo la luz de cada color mientras lo desplazaba a lo largo del espectro. Encontró que las

---

<sup>4</sup>Por ejemplo, la superficie solar, a casi 6000 °C estaría aún en este caso.

<sup>5</sup>Según Mikael A. Bramson, la radiación infrarroja fue descubierta en 1790 por M. Pitke y redescubierta en 1800 por Herschel.

temperaturas más altas se leían invariablemente en el color rojo y probablemente siguiendo un presentimiento, colocó el termómetro más allá de esta zona, encontrando que las temperaturas obtenidas eran aun mayores.

A pesar que Herschel no fue el primero en colocar un termómetro bajo el espectro producido por un prisma, fue él quien descubrió el infrarrojo al detectar energía fuera del espectro visible con su termómetro, realizando así las primeras observaciones solares con radiación no visible. Y aun cuando sólo fue un primer paso (ver figure 1.1), con ello se abrió el espectro electromagnético por debajo del color rojo, de donde proviene el término infrarrojo. Por consiguiente también fue el primero en utilizar un termómetro como el primer detector infrarrojo en la historia. Ese mismo año Herschel publicó su descubrimiento y algunas de las investigaciones sobre esta radiación que llamó "rayos invisibles"; en las que describía sus propiedades de reflexión, refracción, transmisión y absorción reportándolas como iguales a las de la luz ordinaria, por lo que dejó establecido que no se trataba de alguna propiedad nueva de ésta, sino más bien de una zona espectral inexplorada en aquellos años.

FIGURA i.1 \*

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO				
Frecuencia, hertz	Nombre de la radiación	Energía eV Fotón	Longitud Å	
$10^{22}$		$10^7$	$10^{-3}$	1 XU
$10^{21}$	Rayos Gama	$10^6$	$10^{-2}$	
$10^{20}$	..duros...	$10^5$	$10^{-1}$	
$10^{19}$		$10^4$	1	1 Å
$10^{18}$	Rayos - X -	$10^3$	10	1 nm
$10^{17}$	..suaves..	$10^2$	$10^2$	
$10^{16}$	Luz Ultravioleta	$10^1$	$10^3$	
$10^{15}$	Luz Visible	1	$10^4$	1 μm
$10^{14}$	Infrarrojo	$10^{-1}$	$10^5$	
$10^{13}$	milimétricas	$10^{-2}$	$10^6$	
$10^{12}$		$10^{-3}$	$10^7$	
$10^{11}$		$10^{-4}$	$10^8$	1 cm
$10^{10}$	(UHF)	$10^{-5}$	$10^9$	
$10^9$	onda corta	$10^{-6}$	$10^{10}$	1 m
$10^8$	TV FM .....	$10^{-7}$	$10^{11}$	
$10^7$		$10^{-8}$	$10^{12}$	
MHZ $10^6$	Transmisiones Típicas	$10^{-9}$	$10^{13}$	1 km
	(LF)	$10^{-10}$	$10^{14}$	
$10^5$	onda larga	$10^{-11}$	$10^{15}$	
KHZ $10^4$	(VLF)			
$10^3$				

\* del libro Wehr, Richards, Adair: "Physics of the Atom".

Durante los siguientes 30 años a su descubrimiento, muy poco progreso se logró en el estudio de este nuevo tipo de radiación, incluso aún no era aceptado por todos que ésta y la luz visible fueran en esencia de la misma naturaleza. Fue hasta 1847 cuando H. L. Fizeau y L. Foucault al obtener patrones de interferencia, como si se tratara de luz visible y haciendo las extrapolaciones correspondientes, lograron efectuar las primeras mediciones de la longitud de onda asociada al fenómeno,  $1.5\mu\text{m}$  lo que cambió radicalmente esta postura. El siguiente paso fue establecer los límites hasta los cuales se extendía. Con la ayuda de mejores detectores que el termómetro y técnicas cada vez más sofisticadas, se fue pasando gradualmente a longitudes de onda cada vez mayores que la encontrada por Foucault y Fizeau<sup>6</sup>.

Finalmente, la formulación de Maxwell de las leyes de la electrodinámica por un lado, la teoría de Stefan-Boltzmann de la radiación del "cuerpo negro" (que modeló e hizo más claro el comportamiento de esta radiación) y los experimentos de Heinrich Hertz, en 1887, para la generación y estudio de las propiedades de las ondas electromagnéticas descritas por Maxwell comenzaron a cerrar la brecha que todavía había entre las ondas hertzianas y la radiación infrarroja de mayores longitudes de onda.

---

<sup>6</sup> Llegando a  $1.9\mu\text{m}$  en 1859 por J. Muller; a  $2.14\mu\text{m}$  en 1879 por M. Mouton; a  $7\mu\text{m}$  en 1880 por Desains y Courie; a  $20\mu\text{m}$  1897 por Rubens y Pasche; a  $150\mu\text{m}$  por H. Rubens y Nichols un año después.

Actualmente en la zona en que se traslapan, se definen como una u otra más que por su longitud de onda<sup>7</sup> por el origen de su generación y se consideran, aunque de una manera mas bien arbitraria, sus límites máximos en la región milimétrica del espectro.

Hoy a casi 200 años de su descubrimiento, después de haberse superado los obstáculos en su exploración por falta de entendimiento del fenómeno y las limitaciones tecnológicas que existían, la astronomía se ve beneficiada con la introducción de detectores infrarrojos<sup>8</sup> bidimensionales con características y eficiencias cada vez más próximas a las de los detectores utilizados ordinariamente en el visible. Por lo que es de esperarse, además de una reducción notable en los tiempos necesarios para hacer astronomía infrarroja bidimensional, que se inicie un gran auge en las investigaciones dentro de esta zona espectral.

---

<sup>7</sup>Las longitudes de onda más cortas en radio técnicas están en el rango de 0.1 a 10 cm, y son más conocidas con el nombre de micro-ondas.

<sup>8</sup>Desarrollados principalmente a partir de la segunda guerra mundial por sus potenciales y aplicaciones militares.

Utilizando uno de estos detectores infrarrojos, como es el "Nicmos-3", se está desarrollando dentro del Instituto de Astronomía (Ciudad Universitaria y Ensenada B.C.) con la colaboración de la Universidad de Massachusetts, la electrónica, las partes mecánicas y los programas de control para la adquisición y el manejo de datos que conformarán una cámara infrarroja bidimensional para el Observatorio Astronómico Nacional.

Un proyecto tan ambicioso y extenso como éste, necesariamente implica la participación de muchas personas y con especializaciones en muy diversas áreas como son: electrónica, mecánica, programación, criogenia, bajas presiones, etc., razón por la cual el proyecto involucró directamente a todo el grupo de instrumentación así como a los talleres de mecánica y óptica.

El propósito de este trabajo de tesis, además de presentar los antecedentes históricos y los fundamentos teóricos tanto de la radiación infrarroja como de los diferentes detectores existentes, de mencionar algunas de las ventajas de las observaciones en infrarrojo sobre las visibles, es dar una descripción general del instrumento que construimos y de su funcionamiento, centrada alrededor del trabajo experimental desarrollado en la botella criogénica y en la tarjeta analógica-digital; ya que fue en

ya que fue en estas áreas en donde tuve principalmente la oportunidad de colaborar dentro del proyecto. Finalmente se exponen los resultados y conclusiones a los que hemos llegado hasta la temporada de observación correspondiente al mes de abril de 1993.

Capítulo 1.

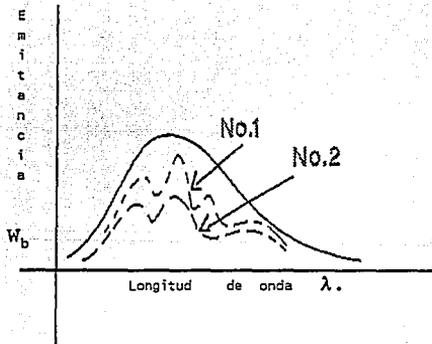
Una vez establecido que la luz y el "calor radiante" son de una misma naturaleza: ondas transversales electromagnéticas, es claro que las leyes y propiedades generales de la radiación serán aplicables en particular a este último, que comprende principalmente la zona infrarroja; resulta interesante que al aplicar consideraciones termodinámicas y electromagnéticas a un cuerpo que está emitiendo radiación, simplemente por el hecho de estar a una temperatura arriba del cero absoluto, al tratar de encontrar y deducir algunas de las propiedades importantes sobre ésta, la falta de concordancia entre los resultados experimentales encontrados y las predicciones calculadas, condujeron paradójicamente a la necesidad de introducir conceptos revolucionarios que dieron origen a una concepción completamente nueva y diferente de la naturaleza y propiedades de la radiación y la materia<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Dentro de los mismos experimentos de Hertz que dieron fuerza a la teoría electromagnética apoyando la postura ondulatoria de la luz, se pueden encontrar también las primeras manifestaciones del efecto foto-eléctrico.

EMISIÓN Y ABSORCIÓN DE RADIACIÓN.

Al observar la Tabla i.1 es fácil intuir que debe de existir una relación entre la temperatura de un cuerpo y la radiación que éste emite<sup>2</sup>. Si vamos un poco más lejos y medimos la energía radiante que emiten varios cuerpos en función de la longitud de onda, por unidad de área y unidad de tiempo, dentro de un intervalo  $\Delta\lambda$ , suponiendo que se encuentren a una misma temperatura, encontraremos al graficar esta información que su representación gráfica sería parecida a cualquiera de las curvas ( No.1 ó No.2) que se muestran en la figura I.1.

Figura I.1

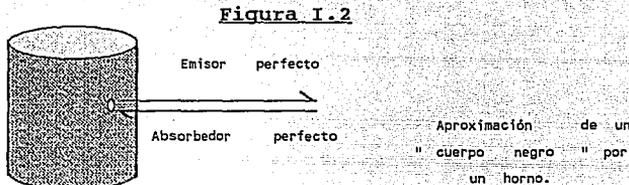
Energía emitida por dos  
cuerpos ( ambos a una  
misma temperatura T ).

Al analizar las gráficas anteriores, se puede observar que en general el cuerpo No.1 es mejor emisor que el cuerpo No.2 y que ambos alcanzan su valor máximo aproximadamente para la misma longitud de onda; repitiendo el experimento para un gran número de cuerpos encontraríamos que las curvas de emisión presentarían rasgos muy similares a los de las curvas mostradas y que además ninguna sobrepasará la envolvente que aparece como una línea continua.

Si colocamos un cuerpo dentro de un "baño de radiación", de la energía que incida sobre él, una fracción pasará a través de éste (transmisión), otra será reflejada y la restante será absorbida; la proporción entre estas fracciones variará con una dependencia marcada en función de la longitud de onda considerada, fenómeno que da origen a los "colores". Si un cuerpo absorbiera toda la radiación que le llega su apariencia sería extremadamente oscura: sería un "cuerpo negro", que es un absorbedor perfecto y su color ya no dependería de su composición, sino únicamente de su temperatura, la curva de energía que emitiría sería la envolvente representada con anterioridad en la figura I.1.

En la práctica, una muy buena aproximación al cuerpo negro, para un intervalo amplio de longitudes de onda, se puede obtener haciendo un pequeño orificio a una de las paredes de un horno adiabático.

La figura I.2 representa, por medio de un cilindro, las propiedades esenciales en un CUERPO NEGRO:



La energía radiante que entre a través del orificio, por la absorción de las paredes y las múltiples reflexiones internas, tendrá muy pocas probabilidades de ser reflejada nuevamente al exterior, por lo que se le puede considerar como un absorbedor perfecto; al calentarlo hasta una temperatura  $T$ , se obtendrá la envolvente presentada sobre las curvas No.1 y No.2, que corresponde a la emitancia del cuerpo negro<sup>3</sup>.

El orificio aparecerá más oscuro que el resto del cuerpo cuando el cilindro esté más frío que sus alrededores y, por el contrario, se verá mas brillante que las paredes cuando su temperatura sea mayor a la de éstas.

---

<sup>3</sup>La dependencia con la temperatura se puede ver en la figura 1.3 mostrada en la página 17.

LEYES DE RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO.

## i) Ley de Kirchhoff:

Para dos cuerpos opacos en equilibrio térmico con sus alrededores y por tanto en equilibrio térmico entre ellos, si su emitancia radiante es  $W_1$  y  $W_2$ , su absorbencia  $a_1$  y  $a_2$  respectivamente, se cumple que:

$$\frac{W_1}{a_1} = \frac{W_2}{a_2} = \frac{W_b}{1} = W_b \quad (\text{EC.I.1})$$

En donde " $W_b$ " es la emitancia de radiación del cuerpo negro con una absorbencia, por definición " $a$ ", igual a la unidad. Esta ecuación se conoce como la Ley de Kirchhoff y nos dice que el cociente entre la emitancia radiativa y la absorbencia de dos cuerpos a una misma temperatura son iguales; e iguales también a la emitancia radiativa de un cuerpo negro a la misma temperatura. De lo cual se deduce que si un cuerpo es un buen emisor, valores grandes de  $W_i(\lambda)$ , también será un buen absorbedor: le corresponderán valores grandes de  $a_i(\lambda)$  para el mismo valor de  $\lambda$ .

De las verificaciones más notables que podemos encontrar a esta ley, están los resultados experimentales encontrados para los gases, los cuales muestran en sus espectros de emisión cambios bruscos para su emitancia en  $\Delta\lambda$  pequeñas para intervalos de  $\lambda$  espaciados a lo largo de su espectro; coincidiendo precisamente estos puntos con sus líneas de absorción. En el caso de los cuerpos sólidos

no ocurren estas variaciones bruscas para el valor de la absorbancia en intervalos grandes de  $\lambda$  y, en general, presentan curvas mucho más suaves y continuas para su emitancia y su absorbancia.

*ii) Ley De Stefan-Boltzman:*

Matemáticamente la energía total radiada, por unidad de tiempo, por unidad de área, para un cuerpo negro es el área total bajo la envolvente de la figura I.1. Stefan encontró empíricamente, basado en las mediciones experimentales de J. Tyndall, que esta área es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta:

$$W(T) = \sigma T^4 \quad (\text{ EC.I.2 } )$$

$$\sigma = (5.66961 \pm 0.00096) \times 10^{-8} \frac{\text{Watts}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \quad (\text{ EC.I.3 } )$$

A  $\sigma$  se le conoce como la constante de Stefan, y la ecuación I.2 se conoce como la Ley de Stefan-Boltzman, ya que posteriormente la derivó Boltzman utilizando argumentos termodinámicos. Nos dice que la energía radiante emitida por un cuerpo negro depende únicamente de su temperatura absoluta. Para cuerpos que se alejan del emisor ideal, se puede introducir la siguiente corrección:

$$W(T) = \epsilon(T) \sigma T^4 \quad (\text{ EC.I.4 } )$$

En donde  $\epsilon(T)$  es la emitancia promedio y generalmente

es una función que presenta muy poca variación con la temperatura, nos dice, que tanto se aleja un cuerpo del "cuerpo negro" ideal y comúnmente se le llama cuerpo gris; para los sólidos es prácticamente constante,  $\epsilon = \text{constante}$ , y depende de la superficie del objeto considerado.

Podemos darnos una idea de la potencia que emiten e intercambian dos cuerpos como "cuerpos negros", uno a la temperatura ambiente  $27^{\circ}\text{C}$  y otro a unos  $57^{\circ}\text{C}$ , si sustituimos en la ecuación I.3 los valores anteriores:  $300$  y  $330^{\circ}\text{K}$  junto con el valor de la constante  $\sigma$ , para obtener:

$$W(300^{\circ}\text{K}) = \sigma(300)^4 \approx 460 \frac{\text{Watts}}{\text{m}^2} \quad (\text{Ec.I.5})$$

$$W(330^{\circ}\text{K}) = \sigma(330)^4 \approx 670 \frac{\text{Watts}}{\text{m}^2} \quad (\text{Ec.I.6})$$

De los resultados anteriores podemos ver que, un cuerpo con una temperatura  $30^{\circ}$  arriba de la temperatura ambiente (aprox.  $300^{\circ}\text{K}$ ), radia  $210 \text{ Watts/m}^2$  más de la energía que está absorbiendo<sup>4</sup>.

### iii) Ley de desplazamiento de Wien:

Wien encontró que al ir cambiando la temperatura de un cuerpo negro las gráficas de la radiación que emite conservan su aspecto general (ver figura I.3), pero van

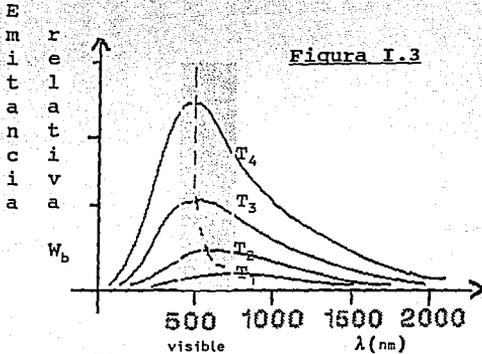
---

<sup>4</sup>Aquí, para simplificar las estimaciones se supuso, para poder utilizar la ley de Stefan-boltzman, que ambos cuerpos están de formas separadas en equilibrio térmico.

alcanzando su valor máximo correspondiente a  $\lambda_{\text{máx}}$ , de acuerdo con la siguiente relación:

$$\lambda_{\text{máx}} T = \text{Const.}$$

( Ec. I.7 )



Curvas de radiación para un cuerpo negro<sup>5</sup>.

$$T_1 = 3000 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_2 = 4000 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_3 = 5000 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_4 = 6000 \text{ } ^\circ\text{K}$$

La hipérbola mostrada en la franja visible corresponde a la ley de desplazamiento de Wien.

El valor de la constante de Wien es:  $2893_{\mu\text{m}} \text{ } ^\circ\text{K}$ .

#### iv) Leyes de Wien y Rayleigh-Jeans:

Conocer la dependencia de la energía en función de la longitud de onda  $\lambda$  es vital para poder entender y describir los fenómenos más interesantes como la transmisión de la radiación a través de la atmósfera, la refractividad y reflectividad óptica en los materiales o la respuesta que pueda tener de un detector. A esta dependencia se le conoce como la distribución de energía emitida por longitud de

<sup>5</sup>Del libro Hecht, Zajac: "Optics".

onda y en general se reporta utilizando el valor normalizado:  $\Delta\lambda/\lambda$ ; experimentalmente se le determina utilizando un espectrómetro que separa físicamente la radiación por sus longitudes de onda.

La semejanza entre las curvas de emisión del cuerpo negro y la obtenida por Maxwell para la distribución de velocidades para las moléculas de un gas, motivó a Wien para tratar de encontrar una curva similar para la distribución de la energía emitida, por un cuerpo negro, en función de la longitud de onda. En el fondo, no es únicamente la apariencia la razón de peso, si las moléculas de un cuerpo negro tienen una agitación térmica, entonces puede esperarse que su distribución de velocidades sea, de alguna manera, parecida a la encontrada por Maxwell y como la aceleración de estas moléculas está relacionada con sus velocidades, sus cargas deberán ser aceleradas "térmicamente" con una dependencia parecida; argumentos que justifican más el esperar una curva similar que simplemente su aspecto semejante.

Wien propuso la siguiente ecuación y encontró las constantes  $c_1$  y  $c_2$  para obtener el mejor ajuste posible.

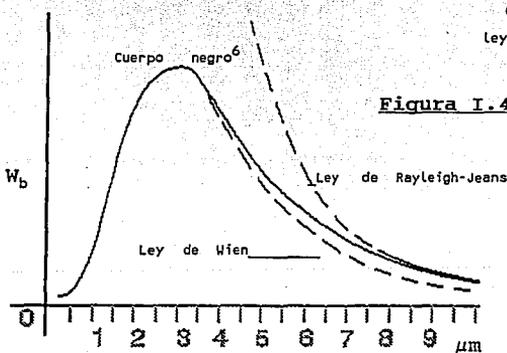
$$W_\lambda d\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}}} d\lambda \quad (\text{Ec.I.8})$$

Siendo más formal y riguroso, Rayleigh trató de derivar una ley teórica para la distribución de las energías observadas, supuso que la radiación electromagnética dentro de las paredes isotérmicas del cuerpo negro forman ondas estacionarias, como las ondas

sonoras dentro de una cavidad acústica, encontró que cada modo de vibración tendría dos grados de libertad, uno para la energía cinética y otro para la energía potencial del oscilador, siendo  $\frac{1}{2}kT$  para cada uno de ellos, y llegó finalmente a la siguiente ecuación para la distribución de la energía emitida:

$$W_{\lambda}d\lambda = 8\pi kT \frac{d\lambda}{\lambda^4} \quad (\text{Ec.I.9})$$

En la figura I.4 se comparan las predicciones de Wien y Rayleigh-Jeans con los valores que presenta la emitancia en un cuerpo negro<sup>6</sup>:



Puede verse, en la figura anterior, que el ajuste de

<sup>6</sup>Para algunos autores, una forma alternativa de definir al cuerpo negro, sería aquel que cumpla con la ley de emisión de Planck.

<sup>7</sup>Del libro Wehr, Richards y Adair: "Physics of the Atom".

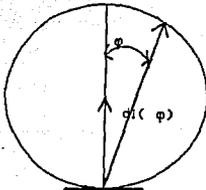
Wien es excelente para valores de  $\lambda$  pequeños, mientras que las predicciones de Rayleigh-Jeans lo son para la parte complementaria; éstas últimas presentan lo que se llama la catástrofe ultravioleta: predicen energías infinitas al irse acercando al origen; por lo que las teorías clásicas, se encontraban ante un problema que no podían resolver.

v) Ley del Coseno de Lambert:

La ley de Lambert expresa la variación de la intensidad de la radiación como función del ángulo de observación que se tenga respecto a la fuente:

$$dI(\varphi) = \frac{\epsilon\sigma T^4}{\pi} dS \cos\varphi \quad (\text{Ec. I.10})$$

Figura I.5



$dS$

Interpretación gráfica  
de la ley de Lambert.

Esta ley se aplica únicamente para un cuerpo negro y para una superficie que sea un dispersor perfecto ó completamente mate. Con ella podemos explicar el hecho por

el cual el sol, siendo una superficie esférica, presenta la apariencia de un disco plano.

vi) Ley de Planck:

Planck se dio cuenta que al restar una unidad en el denominador de la ecuación de Wien ( ver ecuación 1.11), y reajustar las constantes, obtenía tanto para valores de longitudes de onda grandes como para las pequeñas un ajuste "perfecto" a lo largo de toda la curva<sup>8</sup>, y que la ley de Rayleigh se podía tratar como un caso límite para longitudes de onda suficientemente grandes. Así que, ya teniendo el resultado correcto, le faltaba idear cómo hacer una deducción analítica; revisó escrupulosamente los trabajos de Rayleigh y después de no encontrar ningún error en éstos, concluyó que el problema debía estar en la teoría clásica. Por lo que introduce las siguientes hipótesis como puntos básicos para su desarrollo teórico:

- 1) La radiación proviene de los osciladores atómicos, con vibraciones lineales, que generan ondas electromagnéticas del mismo modo que lo hacen para los modelos de Hertz.
- 2) Un oscilador no emite energía continua, sino en paquetes discretos ó cuantos.
- 3) La energía absorbida o emitida de un cuanto

---

<sup>8</sup>Ver figura 1.4.

para un oscilador depende de la frecuencia (ó longitud de onda), de la radiación.

Con lo cual ya podía obtener, el resultado que conocía de antemano:

$$w_i d\lambda = \frac{8\pi c \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1} d\lambda \quad (\text{Ec.I.11})$$

Logrando obtener un ajuste para todo valor de  $\lambda$ .

De esta forma, Planck introduce los conceptos y postulados cuánticos, en el año de 1900, al concluir que la energía no es continua, sino que el valor mínimo para una frecuencia dada está dado por:

$$E = h\nu. \quad (\text{Ec.I.12})$$

Comenzando con ello una nueva etapa en la concepción del mundo físico y en particular de la interacción de la radiación electromagnética con la materia.

Capítulo 2.

**S**in exagerar, se puede afirmar que la transparencia de la atmósfera terrestre a ciertas bandas del espectro infrarrojo fue y es un factor determinante para la existencia de la vida en nuestro planeta.

La radiación solar, con una temperatura aparente alrededor de los 6000·K, esta centrada en las longitudes de onda de 0.5 $\mu$ m, que corresponden a la zona media del visible, en donde el ojo tiene su máxima eficiencia y también la atmósfera es prácticamente transparente a ésta. Ya que menos del 6% de la radiación solar comprendida aquí es absorbida por ésta al atravesarla.

Además de la dispersión y reflexión molecular que provoca que casi un 40% de toda la radiación que llega a la tierra proveniente del sol sea reflejada al espacio exterior, el agua contenida en la troposfera<sup>1</sup>, con casi un 0.1% de total del agua en la superficie terrestre, actúa como válvula para la radiación solar entrante y la radiación infrarroja saliente, jugando estos factores un papel decisivo tanto en las condiciones meteorológicas, como en las ventanas existentes que permiten realizar observaciones astronómicas infrarrojas desde la superficie terrestre.

---

<sup>1</sup>

La troposfera tiene un espesor de 16 Km en el ecuador y 8 Km o menos en los polos, representa el 75% de la masa atmosférica.

## SUBDIVISIONES DEL INFRARROJO.

Ya que el infrarrojo se extiende desde la zona visible hasta la región de las micro-ondas, de  $0.75$  a  $1000\mu\text{m}$ , abarca más de 3 décadas en sus longitudes de onda. O bien, como:

$$2^{10} < \frac{1000\mu\text{m}/c}{0.75\mu\text{m}/c} < 2^{11} \quad (\text{Ec.I.14})$$

implica que comprende casi 11 octavas, si preferimos verlo en términos de sus frecuencias.

Para un intervalo tan amplio como éste resultara útil subdividirlo para facilitar su estudio y posteriormente su manejo. Sin embargo, cualquier subdivisión que se le haga necesariamente será más o menos arbitraria, hecho que se manifiesta al encontrar tantas y tan variadas divisiones que han sido propuestas. Estas subdivisiones se basan generalmente en el tipo de estudio que se realice o en los límites de sensibilidad de los instrumentos que se estén utilizando para ello; pero con el desarrollo de mejores métodos y detectores día con día, estos límites dejan de apegarse a sus propuestas originales.

Así, se puede encontrar en la literatura, por ejemplo, sobre el infrarrojo fotográfico como longitudes de onda entre  $0.7$  y  $1.2\mu\text{m}$ , ó  $0.7$  y  $1.5\mu\text{m}$ ; que correspondería a las frecuencias que siguen siendo captadas por las emulsiones fotográficas y con las cuales pueden seguirse utilizando

las técnicas y aparatos más convencionales de la astronomía óptica. En general encontraremos que se le divide en 3 ó 4 segmentos; infrarrojo: cercano, medio y lejano; ó infrarrojo: cercano, medio, lejano y muy lejano ó extremo.

Las tablas que presento a continuación ( Tablas II.1 y II.2 ), son unas de tantas propuestas, nos dan una idea de la falta de normatividad que hay al respecto:

TABLA II.1 <sup>2</sup>

Designación (infrarrojo:)	Abreviación	Límites $\mu\text{m}$
cercano	IRC (NIR)	0.75 a 1.5
medio	IRM (MIR)	1.5 a 15
lejano	IRL (FIR)	15 a 100
Muy lejano	IRE (XIR)	100 a 1000

"... el infrarrojo cercano tiene prácticamente las mismas propiedades que el visible, salvo que ya no lo puede

<sup>2</sup>Smith, Jones y Chasmar; 1968.

ver el ojo... El infrarrojo medio tiene algunas, pero no todas las propiedades del visible... para el infrarrojo lejano y el muy lejano sus únicos medios de detección son los efectos de calor que produce".

TABLA II.2 <sup>3</sup>

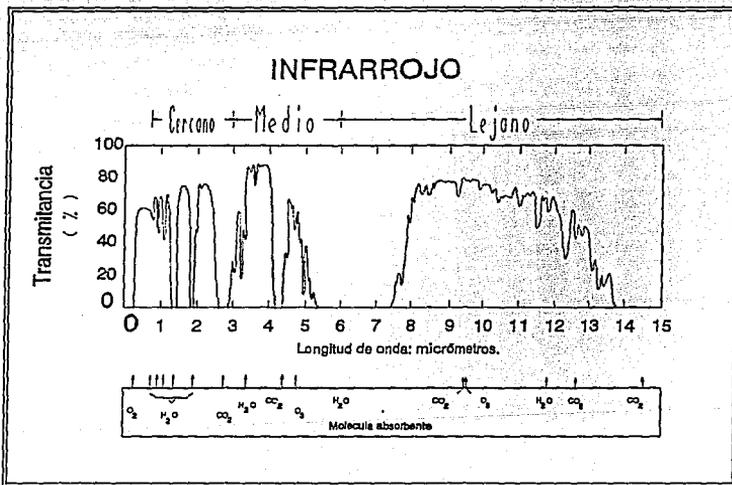
Designación (infrarrojo:)	Abreviación	Límites $\mu\text{m}$
cercano	IRC (NIR)	0.75 a 3
medio	IRM (MIR)	3 a 6
lejano	IRL (FIR)	6 a 15
extremo	IRE (XIR)	15 a 1000

"... las primeras tres subdivisiones incluyen intervalos espectrales en los cuales la atmósfera tiene ventanas que son relativamente transparentes para la radiación infrarroja, mientras que la zona denominada como infrarrojo extremo, con casi 6 octavas de extensión, resulta esencialmente opaca a ésta..."

<sup>3</sup>Richard Hudson Jr. y Jaqueline W. Hudson.

En la figura II.1 encontramos una gráfica detallada de la transmisión y de las moléculas responsables de la absorción para cada una de las ventanas atmosféricas encontradas dentro de las subdivisiones dadas:

FIGURA II.1 <sup>4</sup>



Transmittancia de la atmósfera, al nivel del mar, en una trayectoria horizontal de 6000 pies y con 17mm de agua precipitable.

<sup>4</sup>Del Libro: Hudson, Richard "Infrared Systems Engineering".

También encontramos convenciones como la adoptada por Johnson, quien utiliza letras para definir bandas fotométricas: U, B, V, R, e I (de ultravioleta; "blue", azul; visible; rojo e infrarrojo) que se han tratado de extender para su uso dentro del infrarrojo con: J, K, L, ..., pero como no han sido seguidas por todos de una manera generalizada, es más común encontrar el valor de la longitud de que se trate dentro de paréntesis cuadrados, por ejemplo: en lugar de poner la banda M de  $5\mu\text{m}$ , es más común referirse como  $[4.8\mu\text{m}]$ .

#### TRANSMISIÓN DE LA RADIACIÓN POR LA ATMÓSFERA:

La atmósfera terrestre no es precisamente un medio muy favorable para la transmisión de todo tipo de radiación. Antes que la radiación de un cuerpo llegue a un detector, ésta será parcial y selectivamente absorbida de formas diversas por los diferentes gases atmosféricos, será dispersada fuera de su trayectoria óptica por pequeñas partículas suspendidas en la misma y modulada por las rápidas variaciones de ésta, dando por resultado un efecto parecido al parpadeo que notamos en una estrella cuando la vemos en la noche.

Los efectos del medio que rodea a cualquier observación astronómica desde la tierra, no siendo el infrarrojo una excepción, incluyen la absorción, la dispersión y la refracción. La atmósfera atenúa la radiación que recibe, cambia sus características

espectrales temporales y espaciales, afecta su polarización y coherencia, etc.. Es por tanto un elemento que afecta los sistemas infrarrojos de la siguiente forma:

1.- La absorción por sus constituyentes moleculares como son el vapor de agua, dióxido de carbono, óxido de nitrógeno y otros gases.

2.- La emisión de todos los elementos mencionados y de las partículas suspendidas en ella.

3.- La dispersión de la radiación deseada fuera de su trayectoria óptica, producida por moléculas y partículas.

4.- La dispersión indeseable de radiación de estos elementos dentro de la trayectoria óptica.

5.- La refracción, tanto la que está dentro como la que va hacia afuera de la trayectoria óptica, más los efectos debidos a la naturaleza turbulenta de la atmósfera.

Quizá, en estos procesos, la estructura atmosférica irregular sea el factor de mayor importancia. La turbulencia por ella misma puede afectar tanto la absorción, la emisión y la dispersión, así como también la refracción, por lo que resulta una variable obvia; pero los elementos que la constituyen cambian con el tiempo y la altura, haciendo que ésta no sea ni estacionaria ni homogénea, con lo que su influencia introduce parámetros

muy complicados dentro de toda observación.

Resolver analíticamente este problema en función del ángulo de incidencia, trayectoria y altitud para cada observación, es una tarea muy difícil, pero se puede estimar con una buena aproximación consultando tablas y monogramas desarrollados para ello.

#### VISIBLE E INFRARROJO (DIFERENCIAS Y VENTAJAS):

La idea erróneamente generalizada de que la radiación infrarroja penetra mejor las capas atmosféricas que la luz visible, es cierta sólo para condiciones particulares y muy específicas, pero no es cierta siempre.

Ya que muchas de las partículas en la atmósfera tienen radios entre 0.05 y 0.5  $\mu\text{m}$ , la porción del espectro con longitudes de onda pequeñas en el visible es dispersada mucho más que las correspondientes a longitudes de onda infrarrojas, razón por la cual el cielo es azul y no rojo ó amarillo. Desafortunadamente las nubes y la niebla, que no es otra cosa que nubes que se encuentran al nivel del suelo, están compuestas por gotitas de agua casi esféricas de diámetros que van de 2 a 50 micrones y concentraciones de 20 a 500 gotas por  $\text{cm}^3$  de aire<sup>5</sup> que serán las responsables de la dispersión en la contraparte infrarroja. Una niebla marina espesa puede llegar a contener hasta 1gr,

---

5

84% viene de la evaporación del agua en los océanos y el resto principalmente por la evaporación y transpiración, de las plantas, sobre la tierra.

mientras que una neblina ligera solamente  $0.02\text{gr por m}^3$ .

Para la luz visible la niebla es un excelente reflector. Para el infrarrojo, el agua en forma líquida absorbe fuertemente las radiaciones con longitudes de onda alrededor de  $3\mu\text{m}$ , inclusive hay algo de absorción aun en el espectro visible rojo, lo que contribuye a su color azul y verde cuando la vemos en grandes concentraciones, y obviamente las gotitas de agua contenidas en la niebla al absorber la radiación infrarroja en estas longitudes de onda darán una apariencia opaca por un lado, y además por la ley de Kirchhoff, también deberán emitir intensamente como cuerpos negros en las mismas frecuencias.

En consecuencia, los sistemas de detección infrarroja utilizados bajo la atmósfera terrestre no son inmunes a las malas condiciones meteorológicas presentes durante cualquier observación.

Sólo para un cielo despejado, libre de nubes, dado el tamaño de las partículas restantes presentes (como la dispersión decrecerá a medida que aumenta la longitud de onda), encontramos que a longitudes de onda de  $2.2\mu\text{m}$ , "el cielo será oscuro" resultando posible hacer observaciones sin importar que sea de día o de noche.

Por si esto fuera poco, existe otro grave problema que introduce la atmósfera cuando se hacen observaciones astronómicas en el infrarrojo: ésta también emite radiación infrarroja. La radiación que emite tiene una distribución parecida a la de un cuerpo negro con una temperatura entre

270 y 300°K, modificada por un factor "e" prácticamente igual a 1.0 en sus bandas de absorción y de porcentajes muy pequeños dentro de las longitudes de onda correspondientes a las ventanas atmosféricas, pero sin embargo, aunque aquí la emisividad puede ser muy pequeña, generalmente no es despreciable en comparación con la energía de la fuente que se pretende examinar, cuando se trata de un objeto celeste diferente al sol.

Todos los objetos que estén presentes: los espejos del telescopio, los soportes del secundario y en general todo lo que se encuentre frente al detector radiará aproximadamente a 10<sup>4</sup>°K, problema que no sería tan difícil de resolver si su temperatura fuera constante, pero las fluctuaciones en ella tienen períodos que pueden ir desde horas hasta milisegundos y en consecuencia producen ruido de fondo que se suma a la señal que se está detectando.

Finalmente, aunque pudiera parecer no muy importante, los pájaros e insectos que puedan sobrevolar frente al telescopio mientras se está trabajando, pueden hacer que una noche despejada tenga que abandonarse si estos comienzan a volar alrededor de las instalaciones, como ha ocurrido en muchas ocasiones al tener problemas con la radiación térmica emitida por enjambres de polillas nocturnas y aves que llegan a cruzar el campo de visión.

Todo lo anterior deberá tomarse en consideración para encontrar un buen sitio donde hacer observaciones astronómicas infrarrojas.

**ANTECEDENTES EN LOS USOS DEL INFRARROJO:**

Los estudios sobre la transmisión de la radiación infrarroja por la atmósfera comenzaron en 1839 con los trabajos de Melloni, Langley continuó después estas investigaciones y fue hasta 1917 cuando Fowle las extiende de los  $5\mu\text{m}$  hasta los  $13\mu\text{m}$ , dejando los mapas detallados de las bandas de absorción y de los agentes responsables de ésta parecidos a los mostrados anteriormente ( después en 1942 Adel las complementa hasta los  $24\mu\text{m}$ ).

Hemos visto como el estudio de la radiación térmica jugó un papel decisivo en el establecimiento de la naturaleza dual de la luz y de la teoría cuántica a comienzos del siglo XX. Para estas fechas la parte experimental del infrarrojo había avanzado considerablemente. Ya se contaba con bolómetros y termopilas, así como con los equipos eléctricos necesarios para su uso. También los interferómetros y las técnicas para las mediciones de longitudes de ondas cada vez mayores permitieron realizar nuevos experimentos en esta zona.

Ya en este siglo, W. Coblentz comienza como pionero estudios y aplicaciones en la espectroscopía infrarroja y de radiometría de precisión. Propone estándares para la radiación térmica y realiza mediciones de temperaturas estelares y planetarias. Obtiene también la absorción, emisión y reflexión de espectros infrarrojos de un gran

número de materiales orgánicos e inorgánicos que proporcionaron evidencia analítica de mucho valor para la mecánica cuántica.

La observación en 1913 de algunos espectros de rotación da apoyo directo al concepto de los modos vibracionales del movimiento de las moléculas y estimula la investigación en este campo. Hoy en día la utilización del espectro de absorción permanece como una de las herramientas más poderosas en los estudios fundamentales de uniones químicas y de la estructura molecular.

Durante la 1ª guerra mundial comienzan a utilizarse, de manera más bien experimental, sistemas de comunicación y de detección primitivos que permitían detectar a una aeronave que estuviera a 1 milla de distancia ó a una persona alejada unos 300mts.

En el período entre la 1ª y 2ª guerra mundial se desarrollan los foto-detectores y los convertidores de imágenes que resulta de gran importancia por su uso militar al permitir ver en la obscuridad. Los convertidores de imágenes transforman una imagen infrarroja en una imagen visible para el ojo utilizando el efecto fotoeléctrico; pero su respuesta estaba alrededor de  $1\mu\text{m}$  y aquí muy pocos blancos militares emiten en esta longitud de onda, por lo que paralelamente se desarrollaron fuentes de iluminación para poderlo utilizar; lo que dio como resultado el desarrollo de la lámpara de tungsteno sellada que utilizan actualmente los automóviles, a ésta se le añadía un filtro

para bloquear la luz visible. Este tipo de sistema se denomina activo y consiste en iluminar lo que se desea detectar (como sucede al hacer uso de un radar). En contraste, un sistema pasivo es el que no emite radiación y se limita a detectar la radiación que emite el objeto por el mismo.

Durante la 2ª guerra mundial los alemanes hacen uso exitoso de sistemas de comunicación infrarroja, el "Lichtsprecher", en el desierto de Africa en 1941-1943. Integran también a sus tanques convertidores de imágenes que prueban ser muy efectivos en las batallas nocturnas.

Por otro lado los norteamericanos desarrollan el "Sniperscope", que consistía en un convertidor de imágenes y una fuente de iluminación montada en una carabina, ésta le permitía a un soldado hacer disparos certeros, en completa obscuridad, a una distancia aproximada de 70 mts. y se utilizó por primera vez en combate el año de 1945 en la invasión a Okinawa.

A pesar de su muy limitado uso y del éxito relativo durante la guerra, los dispositivos infrarrojos para usos militares prometían mucho, y por ello se destinaron fuertes recursos económicos para su desarrollo, posterior a la guerra. Con ello se aceleró el desarrollo de nuevos detectores y materiales ópticos para hacer tecnología infrarroja, al final de los años 50 comenzó a liberarse algo de la información de todas estas investigaciones en donde ya era posible guiar y perseguir misiles por medio de la radiación infrarroja, estabilizar vehículos espaciales,

medir temperaturas planetarias con mucha precisión, la medición de la temperatura dentro de una cámara de explosión, hacer pruebas y mediciones no destructivas en muchos procesos como la detección temprana del cáncer, o de procesos de extrusión, etc..

Pero sin duda, el uso mas común que se le sigue dando a la radiación infrarroja es también el más antiguo, y es el de proporcionar calor radiante en las habitaciones. A raíz de los estudios realizados para mejorar los sistemas de calefacción en casas y edificios se han desarrollado pirómetros basados en nuevos fotodetectores de respuestas rápidas y con ellos a su vez se han podido hacer mediciones en cambios de temperatura tan breves como las "manchas calientes" que se producen por fricción entre dos superficies.

Otra de sus aplicaciones generalizadas hoy en día, está en la meteorología; ya que las nubes están a una temperatura ligeramente inferior a la temperatura de la tierra, entonces su emisión y máximo como cuerpos negros difiere ligeramente al de ésta, por lo que las nubes que cubren la tierra pueden ser observadas fácilmente de noche cuando su observación visual no es posible, haciendo con ello una realidad el uso de sistemas meteorológicos "infrarrojos" ininterrumpidos.

Capítulo 3.

**P**ara poder caracterizar y medir la eficiencia que tienen los detectores de convertir la energía que absorben en una señal aprovechable se emplean los siguientes parámetros básicos:

**SENSIBILIDAD (Responsivity):** se define como la señal obtenida en la salida por unidad de la señal de entrada.

$$R = \frac{V_s}{P} = \frac{V_s}{HA} \text{ (volts/watt)} \quad (\text{Ec. III.1})$$

$V_s$  es el valor del voltaje en la salida del detector para una potencia de entrada de P watts (ambos valores son RMS). H es la irradiancia sobre el detector en  $\text{Wcm}^{-2}$  y A el área sensible en cm, (en general se supone como fuente de iluminación un cuerpo negro a  $500^\circ \text{K}$ ).

**POTENCIA EQUIVALENTE AL RUIDO (Noise Equivalent Power NEP):** NEP es el flujo de potencia mínimo de radiación que puede ser captado por un detector para producir una salida  $V_s$  igual al nivel de ruido  $V_n$  del mismo detector, ambos valores son RMS:

$$NEP = \frac{P}{V_s/V_H} \quad (\text{Ec. III.2})$$

$$NEP = \frac{V_H}{R} \quad (\text{Ec. III.3})$$

DETECTIVIDAD: es el recíproco del NEP.

$$D = \frac{1}{NEP} (\text{Watts}^{-1}) \quad (\text{Ec. III.5})$$

DETECTIVIDAD ESPECIFICA D\*:

$$D^* = D(A\Delta f)^{1/2} = \frac{(A\Delta f)^{1/2}}{NEP} \quad (\text{Ec. III.6})$$

Es la razón señal a ruido cuando se ilumina con un watt de potencia a un detector de una área de 1 cm<sup>2</sup> y el ruido se mide en un ancho de banda de 1 Hz..

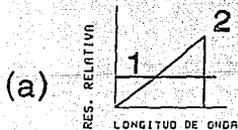
TIEMPO DE RESPUESTA:  $\tau$ , caracteriza la respuesta del detector a un cambio rápido de la señal de entrada y es el tiempo que le toma al detector para que su señal de salida se eleve del valor cero al valor  $(1 - 1/e)$  del valor pico, o para decaer de éste a un valor  $1/e$  (con ello, los cambios de estado ya son mayores al 60%).

## RESPUESTA ESPECTRAL:

Al considerar a un detector para un uso especial, es esencial conocer su respuesta a las diferentes longitudes de onda que recibe. Esta generalmente se conoce a través de su gráfica como función de la longitud de onda para un intervalo en el que se mantiene fijo el flujo radiante por unidad  $\Delta\lambda$ .

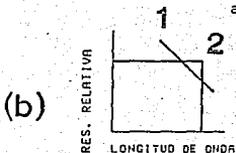
La respuesta de un detector térmico es proporcional a la energía que absorbe, por lo que su gráfica sería idealmente constante; y para un fotodetector su respuesta espectral ideal sería lineal, hasta llegar a su frecuencia de corte que está determinada por el material de que este hecho el detector. En la figura III.2 se grafican las respuestas ideales de un detector térmico y de un fotodetector:

Figura III.1



(a) para un flujo constante  
en un intervalo unitario  $\Delta\lambda$ .

1: TÉRMICO  
2: FOTÓNICO



(b) para un número  
constante de fotones en el  
mismo intervalo  $\Delta\lambda$ .

EFICIENCIA CUÁNTICA ( $QE$  ó  $\eta$ ): Nos dá para un fotodetector la razón del número de eventos registrados por segundo que ocurren como resultado de la llegada de fotones que llegan al detector.

#### RUIDO:

Prácticamente al utilizar cualquier equipo para hacer una medición, el límite inferior para detectar una señal débil lo establece el ruido que siempre estará presente y aun cuando la cantidad que se este midiendo no sea en sí pequeña, la presencia de éste degradará siempre la precisión de las mediciones que efectuemos.

Algunas de éstas formas de ruido son inevitables ya que son debidas a fluctuaciones naturales de la cantidad que se está midiendo, pero también puede ser otra señal superpuesta y no deseada, como ocurre en el caso de la interferencia. Al ruido se le puede caracterizar tanto por su espectro de frecuencias, como por la distribución de su amplitud, o por el mecanismo físico responsable de su generación.

Ruido de fondo (Background Noise): se debe a las fluctuaciones al azar de la tasa con que inciden los fotones sobre cualquier detector, lo que genera a su vez fluctuaciones en la salida del detector.

**Ruido de Johnson:** se produce por el movimiento al azar de los portadores de carga dentro de cualquier elemento resistivo (aun cuando éste se encuentre en equilibrio térmico), por ejemplo, cualquier resistencia a una temperatura T, aun sin estar conectada, generará un voltaje en sus terminales conocido como ruido de Johnson. Su espectro de frecuencia es plano por lo que también es llamado ruido blanco, lo que significa que existe la misma potencia de ruido en cada hertz de frecuencia.

Para una resistencia R a una temperatura T el ruido de Johnson estará dado por:

$$V_{NOISE}(rms) = V_{nr} = (4kTRB)^{1/2} \quad (\text{Ec. III.7})$$

en donde k es la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta en grados Kelvin, y B es el ancho de banda en hertz.  $V_{NOISE}(rms)$  es lo que mediríamos en la salida si utilizamos un filtro pasabanda perfecto con un ancho de banda B. Por ejemplo, a la temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ ):

$$4kT = 4 \times (1.380 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}) \times (20 + 273.16 \text{K}) = 1.62 \times 10^{-20} \text{V}^2/\text{Hz} - \Omega$$

para una resistencia R de 10K medidos en un ancho de banda de 10KHZ obtendríamos un valor de  $1.3\mu\text{V}$ , y a temperatura de nitrógeno líquido ( $77.3^{\circ}\text{K}$ ) serían:  $0.65\mu\text{V}$  (la mitad del valor).

La amplitud del ruido de Johnson para cada instante no

se puede predecir pero sus valores obedecen una distribución de amplitudes gaussianas. Su analogía física en el caso de un fluido sería el del movimiento Browniano.

Ruido de Disparo (Shot Noise): ya que una corriente eléctrica es el flujo de cargas eléctricas discretas, y no un flujo ideal de algún fluido, la cuantización de la carga da por resultado una fluctuación estadística de la corriente que está dada por :

$$I_{NOISE} (rms) = I_{DC} = (2qI_{DC}B)^{1/2} \quad (\text{Ec. III.9})$$

en donde q es la carga del electrón y B el ancho de banda. Por ejemplo una corriente "estacionaria" de 1Amp tendrá una fluctuación de 57nA, medidos en un ancho de banda de 10KHZ, esto es, fluctúa alrededor de un 0.000006%. Las fluctuaciones relativas son mayores para corrientes más pequeñas, para 1µA DC en las mismas condiciones tendríamos ya un 5.6% de variación.

Este ruido también es Gaussiano y blanco.

Ruido 1/f: El ruido de disparo y el ruido de Johnson son generados de acuerdo a principios físicos fundamentales, por lo que su naturaleza no se puede cambiar, así que tanto el resistor más barato como el más caro tendrán exactamente los mismos valores para el ruido de Johnson que generen. Sin embargo, muchas de las componentes electrónicas, como los transistores, diodos y

semiconductores en general, presentan fluctuaciones en los valores de sus resistencias que dan lugar a otro tipo de ruido proporcional al de la corriente continua que pase a través de ellos y el cual depende de su manufactura (de los materiales utilizados y del tipo de conexiones que tengan en sus extremos). Este ruido tiene un espectro aproximado a  $1/f^n$ <sup>1</sup>, contiene la misma potencia por cada década de frecuencia y algunas veces se le conoce como ruido rosado (pink noise).

Ruido de Generación-Recombinación (G-R): éste ruido se debe a las fluctuaciones que se presentan en la razón de la generación y recombinación de los portadores libres en un semiconductor (generaciones que son de origen óptico o térmico), haciendo con ello variar el promedio presente en un momento dado y con ello el valor de su resistencia. El espectro del ruido de generación-recombinación es plano hasta cierto valor para el cual se vuelve igual al inverso de la vida media de los mismos portadores, pasando a decaer aproximadamente a 6dB por octava.

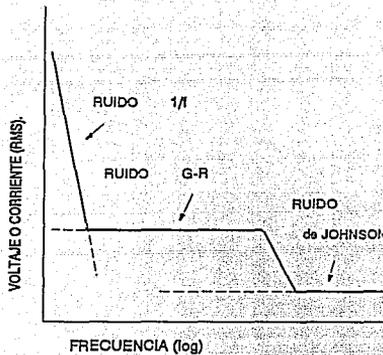
Ruido de temperatura: este ruido se presenta únicamente en los detectores térmicos y es debido a los cambios de temperatura por las fluctuaciones con que ocurre la transferencia de calor del detector hacia sus alrededores. El detector puede considerarse como una capacitancia térmica conectada a un sumidero de calor a temperatura  $T=cte.$  a través de una conductancia térmica  $G.$

1

Los mecanismos que generan este tipo de ruido no son aun muy bien entendidos, pero el valor de  $n$  está comprendido entre .8 y 2.

Las Contribuciones relativas de las fuentes de ruido para un fotodetector en la ausencia de radiación pueden apreciarse en la figura III.2. En la literatura técnica es muy común encontrar como unidades de ruido a cualquiera de las siguientes:  $\text{VOLTS-Hz}^x$  ó  $\text{VOLTS}^2\text{-Hz}$ , así como también las cantidades  $e_n$  e  $i_n$ ; dependiendo del contexto del que se esté tratando.

Figura III.2



Como puede verse, para frecuencias bajas el ruido  $1/f$  es el que domina, para las frecuencias medias es el G-R, mientras que para las altas domina el ruido de Johnson; los valores de estos intervalos cambiarán en cada situación particular, pero se refieren siempre a las zonas que delimitan las intersecciones de estas curvas como lo muestra la figura.

## DETECTORES

Un detector infrarrojo es un transductor que convierte la energía radiante infrarroja en una señal que se puede medir, como una corriente eléctrica, un cambio físico del detector o el oscurecimiento de una placa fotográfica.

Los instrumentos utilizados para la detección de la radiación infrarroja se pueden dividir en dos grupos distintos: aquellos que usan los efectos de calentamiento de la radiación, que son conocidos como detectores térmicos y los que usan el efecto cuántico fotoeléctrico, denominados fotodetectores, que a diferencia de los detectores térmicos sus propiedades están relacionadas directamente con la liberación de electrones en el detector cuando éste absorbe un cuanto independiente de la radiación que recibe. Esto es, los fotodetectores "cuentan" los paquetes individuales de radiación mientras que los detectores térmicos responden a la cantidad total de energía que absorben <sup>2</sup>.

## DETECTORES TÉRMICOS

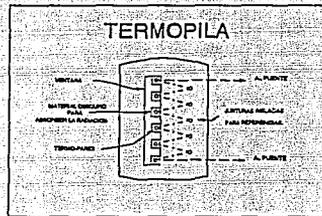
El primer detector infrarrojo, como se mencionó en la introducción, fue un termómetro, pero no fue hasta que se utilizaron las propiedades eléctricas de los materiales que se incrementó notablemente la sensibilidad en un detector térmico.

---

<sup>2</sup>La emulsión fotográfica responde individualmente al número de fotones que absorbe, transformando el bromuro de plata en plata y bromo ionizados, por lo que es entraría dentro de los detectores cuánticos.

Usando el efecto termoeléctrico de dos alambres muy finos de diferentes materiales se pueden registrar cambios de temperaturas muy pequeños<sup>2</sup>, además si se conectan varias de éstas juntas en serie se aumenta mucho más su sensibilidad formando lo que se conoce como una termopila.

Figura III.3



El siguiente paso importante en el desarrollo de los detectores térmicos fue el aprovechar el cambio de la resistencia eléctrica en diversos materiales como función de su temperatura, a este aparato se conoce como bolómetro y consiste de un elemento térmico conformado por un fino alambre insertado en uno de los brazos de un puente de Wheatstone<sup>3</sup>, al aumentar la temperatura en éste, cambia su resistencia eléctrica y esto provoca un desajuste que se mide como una corriente que circula a través del puente, inclusive aún cuando los cambios en la resistencia sean muy

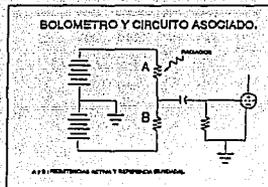
<sup>2</sup>El primer dispositivo de este tipo lo creó Melloni en 1829.

<sup>3</sup>Que es de los arreglos de resistencias más utilizados en laboratorio.

pequeños es posible detectarlos con una gran precisión por la naturaleza del dispositivo eléctrico en que está montado.

En la siguiente década se introdujeron mejoras a las termopilas y desde entonces tanto éstas como el bolómetro compitieron entre ellos como los mejores detectores disponibles. Así permanecieron hasta que se hicieron nuevos bolómetros utilizando materiales superconductores por un lado y semiconductores por otro incrementando su sensibilidad muy por encima de cualquier termopila eléctrica.

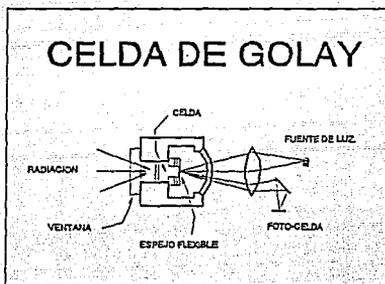
**Figura III.4**



En principio cualquier cantidad o efecto que sea alterado por cambios de temperatura en un material puede ser explotado para hacer un detector térmico, se ha intentado por ejemplo usar el cambio de la constante dieléctrica de algunos materiales, pero su sensibilidad es muy inferior a la de los aparatos mencionados anteriormente.

Utilizando la expansión de un pequeño volumen de gas, como elemento sensible, se desarrolló un termómetro llamado celda de Golay (figura III.6); éste consiste en un diafragma que al aumentar la presión sobre él, su desplazamiento es detectado por un dispositivo mecánico y eléctrico; su sensibilidad absoluta es la misma que la de un termopar.

Figura III.5



Otro método completamente diferente fue ideado por John Herschel en 1840, sin mucho éxito, y perfeccionado casi un siglo después por Czern y sus colaboradores quienes lograron con técnicas de evaporación "fotografías térmicas" directas<sup>3</sup>. Las que pueden verse por métodos de

<sup>3</sup>

También E. Becquerel en 1843 logró obtener placas impresas de radiación infrarroja pero para longitudes de onda muy cercanas al visible.

interferencia óptica. Aunque la sensibilidad que tienen estas películas de aceites ó de finísimas partículas en suspensiones es pequeña al compararles con la termopila o el bolómetro.

### FOTODETECTORES

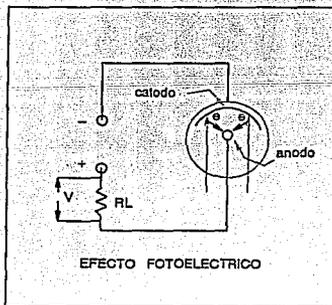
No fue sino hasta mediados de este siglo que se observaron efectos fotoeléctricos inducidos por radiación infrarroja, con lo que se comenzó el desarrollo de los detectores cuánticos para esta zona del espectro.

La respuesta de un fotodetector está determinada por el número de fotones efectivos que inciden sobre él con energías mayores a un valor  $E_0$  (que es característico del material del detector usado) y los fotones con energías menores a este valor umbral serán pasados de largo e ignorados como eventos cuánticos.

En los detectores cuánticos, debido a que la interacción entre los fotones incidentes y los electrones del material es más directa, sus tiempos de respuesta son pequeños, están en el orden de microsegundos en lugar de los milisegundos que son los tiempos típicos para los detectores térmicos, difieren también en que su respuesta espectral depende marcadamente de la longitud de onda según los materiales de que estén compuestos. Su sensibilidad puede ser de uno o varios ordenes de magnitud mayor, pero en general se les debe enfriar a temperaturas criogénicas (ver capítulo 4).

Cuando un fotón incidente transfiere su energía a un electrón dentro del material de un fotodetector, la energía cinética que adquiere puede ser suficiente para que éste escape de la superficie (efecto fotoeléctrico) como se muestra en la figura III.6 , sin embargo, para las longitudes de onda comprendidas dentro del infrarrojo, es más común que se den otro tipo de foto-efectos en los cuales el electrón no es arrancado del material, sino que únicamente adquieren la energía para pasar de una banda de no conducción a una banda de conducción. En la actualidad se sabe que estos foto-efectos los presentan todos los materiales conductores o semiconductores, la dependencia que tienen con la frecuencia del fotón incidente determinará para que intervalos podrá servir ese detector.

Figura III.6

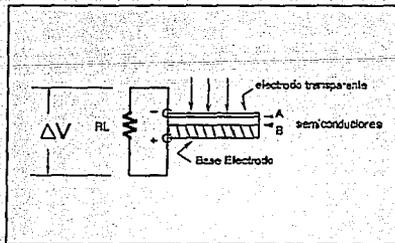


En el caso de los semiconductores, dependiendo del material de que se trate, se producirán portadores de carga consistentes en un par hueco-electrón (si se trata de un semiconductor intrínseco ó puro) y dará portadores mayoritarios de carga positiva o negativa (si es de tipo p ó n) para uno extrínseco. En una unión p-n el fenomeno se dará en ambos lados de la unión.

Para medir estos efectos producidos en los materiales de los fotodetectores se puede proceder de las tres formas que involucran la ley de Ohm:

- 1) Se puede medir el voltaje que se presenta en sus extremos con la ayuda de una resistencia externa.

Figura III.7



2) Se puede medir el cambio de corriente que circulará por el material debido a la variación que presente en su resistencia.

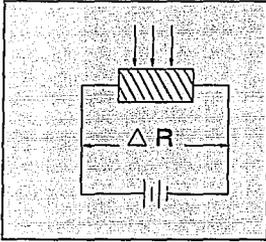
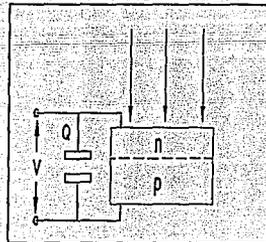


Figura III.8

3) O se podran medir la carga que se separa en sus extremos y medirla en función de un voltaje.

Figura III.9



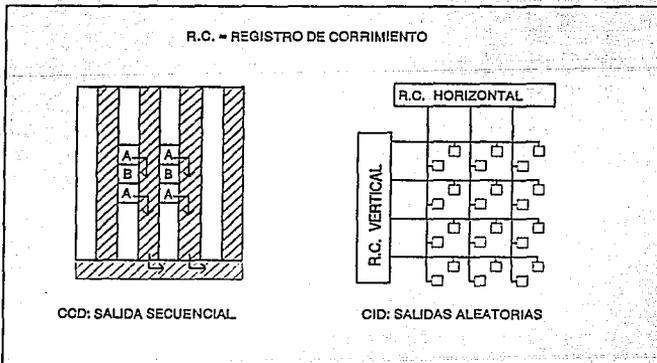
Los detectores pueden clasificarse también dependiendo de que formen ó no imágenes bidimensionales. La ventaja de estos es que no será necesario construir la imagen por medio de un desplazamiento del detector y en consecuencia, los tiempos necesarios para hacer una observación se reducen enormemente.

Para formar un arreglo de detectores bidimensionales, se utilizan arreglos matriciales de detectores individuales en celdas llamadas "píxeles" y para poder leer la información contenida en cada uno de ellos con el fin de formar una imagen, es necesario contar con un mecanismo que permita recoger o transmitir la información contenida dentro de los elementos de esta matriz. A los detectores matriciales junto con los dispositivos para poder leer su información se les denomina dispositivos de imágenes con transferencia de carga "Charge Transfer Device (CTD) Imagers" y los más utilizados son los llamados CCDs (irCCD para el infrarrojo) y los CIDs.

Para los CCDs (Charge-Coupled-Device) como su nombre lo indica, la información de cada elemento de la imagen se va transfiriendo secuencialmente como un paquete de carga a uno de los píxeles del renglón adyacente inferior, esto se logra recorriendo pozos de potencial manejados con los pulsos de un reloj externo, de tal manera que por uno de los extremos del renglón inferior ( o de uno adicional) se va leyendo la información de las columnas del renglón que se haya transferido después de un número  $n$  de los procesos mencionados.

Para un detector de tipo CCD la salida es común y la información es la que se va recorriendo para que pueda llegar a ésta. Mientras que para los CIDs (Charge-Injection-Devices) se tiene una matriz con direcciones X-Y y en lugar de ir desplazando la información, los ductos de salida del detector se direccionan por medio de registros de corrimiento verticales y horizontales al valor X y Y deseados dentro de la matriz, de donde se toman las lecturas dadas, por ejemplo, sobre la descarga de un capacitor que forma parte de cada una de las celdas de imagen o pixeles. Por lo que con un dispositivo CID es posible en principio, al no tener una salida común para todo el detector, hacer lecturas aleatorias y no necesariamente secuenciales como sucede con los dispositivos CCDs.

Figura III.10



Capítulo 4.

**P**ara poderle disminuir su corriente oscura, a muchos detectores se les deben operar a temperaturas criogénicas, alrededor de 77°K o menores. Para lo que es necesario colocarlos dentro de recipientes diseñados especialmente para ello llamados crióstatos o dewars; estos recipientes o botellas son magníficos aislantes térmicos y su temperatura interior es muy baja. Su principio de aislamiento es muy parecido a el de los termos utilizados para el café<sup>1</sup>, pero su diseño y construcción son mucho más complicados y costosos. Especialmente para hacer observaciones infrarrojas, estas botellas además de los dispositivos requeridos para enfriar al detector, deben contemplar también los mecanismos necesarios para enfriar el entorno óptico dentro de ellas.

**BOTELLA CRIOGÉNICA O CRIÓSTATO:**

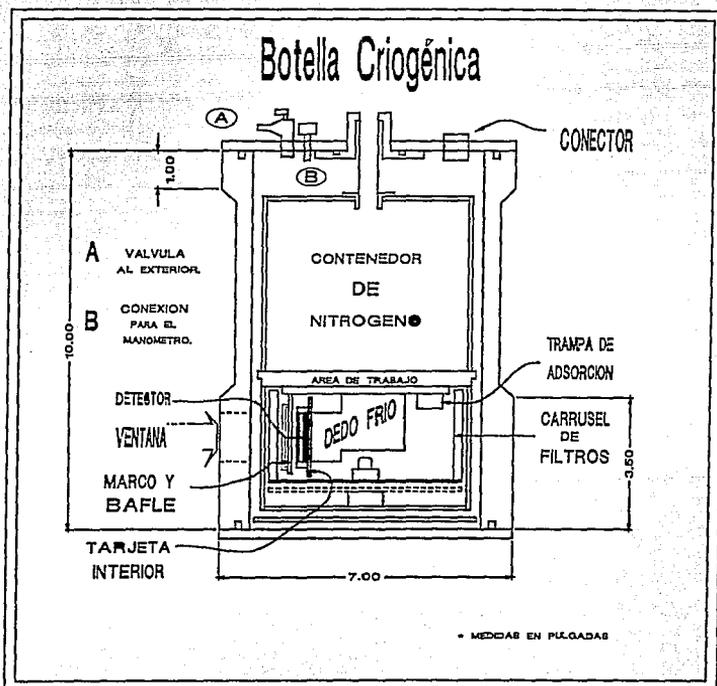
Las partes principales que integran el crióstatos son: Un contenedor de nitrógeno líquido, una área de trabajo, un dedo frío, un baffle, una pupila fría, un carrusel de filtros, una ventana hacia el exterior, una tarjeta electrónica, un conector eléctrico para enviar y sacar señales del exterior al detector, una trampa de adsorción, una válvula de evacuación, un medidor de vacío (termopar)

---

<sup>1</sup> Ya que ambos impiden la transferencia de calor, por radiación, conducción y convección, del sistema con el exterior de la misma forma.

y obviamente el propio detector. En el exterior se cuenta además con un motor de pasos para mover al carrusel interior que contiene los filtros.

Figura IV.1



En este punto las diferencias entre los sistemas ópticos para luz visible y detección infrarroja ayudan a entender mejor su funcionamiento: para los sistemas "visibles" con un detector como una cámara fotográfica, basta con dar un acabado negro mate a las partes interiores del sistema y colocar un bañe para eliminar o al menos minimizar la radiación que no provenga del cono de luz que formará la imagen. De otra forma, en los sistemas infrarrojos la radiación térmica de cualquier parte u objeto frente a él reducirá la sensibilidad en el sistema ya que introducirá radiación parásita. Podemos pensar en una analogía con la luz visible como una cámara fotográfica cuyo interior este iluminado con una luz brillante, lo que velaría la película y nos causaría un sinnúmero de problemas, por lo que tendríamos que idear dispositivos para disminuir o eliminar el brillo interior dentro de la cámara. Este "brillo" térmico es el que se elimina al enfriar el entorno óptico y las partes accesorias que contiene el crióstato.

1) El contenedor de nitrógeno líquido: es un recipiente metálico de capacidad de poco más de un litro. Para el nitrógeno la temperatura de evaporación a una presión de 760mm Hg (una atmósfera) es de 77.3°K y su capacidad de refrigeración es de 44.4 W hr litro<sup>-1</sup> que es la cantidad de calor necesaria para regresar un litro de nitrógeno líquido a su estado gaseoso. Su tarea es mantener por contacto a esta

temperatura el área de trabajo sobre la cual va fijo el dedo frío. En su exterior es conveniente colocarle un tubo, como tiro de chimenea, para evitar que el gas frío que sale de la botella caiga sobre los conectores eléctricos, ya que la condensación de vapor sobre ellos puede inducir cortos circuitos que dañarán al detector.

El nitrógeno disponible es suficiente para trabajar casi 48 horas, por lo que se puede estimar que la entrada de calor del exterior hacia nuestro sistema es alrededor de 1 Watt.

2) El dedo frío: para enfriar al detector es necesario contar con un buen camino térmico desde éste hasta el área de trabajo, para ello se utiliza un bloque de cobre, ya que su conductividad térmica es alta<sup>2</sup>, con una sección de 13X13mm y que está fijo sobre el área de trabajo por un extremo y al detector en el otro. A nivel microscópico una superficie aparentemente plana se verá llena de rugosidades y puntos mucho más salientes que otros, por ello, se pulen ambas caras como si se tratara de superficies ópticas y dejarlas dentro de una tolerancia de 10 y 20 longitudes de onda; así, al ser lo más

2

Para el cobre :  $9.2 \times 10^{-2}$ .  
 para el aluminio:  $4.9 \times 10^{-2}$ .  
 y para el aire :  $5.7 \times 10^{-6}$ .  
 (K cal/seg Metro °C.) a temperatura ambiente.

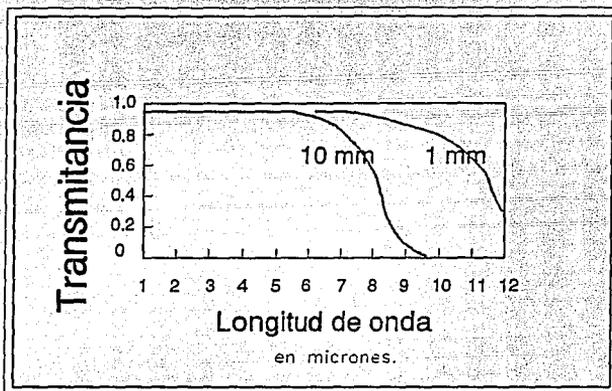
planas posible, se optimiza el área de contacto y con ello el flujo de calor. Además, para llenar los espacios vacíos, que siempre quedarán, se puso una película delgada de grasa de silicón especial para vacío.

3) Baffle y Pupila fríos: Para observaciones infrarrojas, se coloca dentro de la botella además de un baffle formado por láminas pintadas con un acabado mate que tenga baja reflexión, un blindaje llamado pupila ó diafragma frío (Cold Stop), colocado entre el baffle y la ventana del crióstato; la superficie posterior de esta pupila, deberá estar a una temperatura similar a la del detector para que su emisión de radiación térmica sea pequeña y sirve además para limitar el campo de visión al detector que en nuestro caso es:  $f/13$ .

4) Ventana exterior: la entrada de la radiación exterior hacia la botella se hace a través de una ventana de fluoruro de calcio ( $\text{CaF}_2$ ) de un espesor de 3mm ( $1/8$ " ) y un diámetro de 5cm (2"); las caras de la ventana tienen una calidad de un plano óptico a  $\lambda/2$ . Su índice de refracción a  $2.2\mu\text{m}$  es de 1.42. Éste material es prácticamente insoluble al agua: 0.002gr/100ml  $\text{H}_2\text{O}$  a  $20^\circ\text{C}$ , pero es atacado fácilmente por soluciones de amonio. Ya que tiene un elevado coeficiente de expansión

térmico junto con una baja conductividad térmica, se fractura fácilmente ante impactos térmicos o mecánicos. En la figura IV.2 se muestra su transmitancia para el intervalo de 1 a 12  $\mu\text{m}$ .

Figura IV.2



\* del Libro: American Institute of Physics Handbook.

Ya que entre las paredes exteriores y las componentes interiores de la botella debe existir un vacío en el intervalo de  $10^{-4}$  a  $10^{-6}$  mm para garantizar un aislamiento térmico eficiente, la temperatura de las paredes externas, y en particular la de la ventana, no deberán ser sensiblemente inferior al ambiente externo. Por lo que aquí

una apariencia nublada de ésta o la presencia de condensación de agua, siempre será un indicador de que el vacío dentro del crióstato es deficiente y por ello enfría inadecuadamente también al exterior. Para reforzar el aislamiento térmico se colocó una envoltura de más de 10 capas de "mylar" aluminizado que rodean al contenedor de nitrógeno líquido y el carrusel de filtros, su superficie se arruga previamente y van entre las paredes interiores y exteriores (de esta forma se minimiza el flujo de calor por contacto entre capa y capa).

5) El carrusel de filtros: el sistema cuenta también con un carrusel de filtros con 12 posiciones. Siendo una de ellas ciega, sirviendo como obturador, y en las restantes se pueden colocar cualquiera de los filtros con los que se cuenta actualmente. La selección de los filtros dentro de la botella puede ser manual, por medio de una perilla, ó a través de una instrucción, enviada al motor de pasos exterior, por medio de la computadora. El acoplamiento mecánico es por medio de ejes construidos con acero inoxidable, utilizado por su alta resistencia térmica, además se colocó como traspasador un sello ferro fluidico que es de tecnología muy novedosa. La lista de filtros y las bandas espectrales en que se utilizan cada uno de ellos se listan en la tabla IV.1.

TABLA IV.1

Número	DESCRIPCIÓN (FILTROS)	BANDA ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )
1	I	0.9	0.09
2	J	1.2	0.12
3	H	1.6	0.16
4	Short K-band	2.16	0.32
5	Mauna Kea K'	2.125	0.35
6	H <sub>2</sub> V=1-0 S(1)	2.122	0.02
7	H <sub>2</sub> V=2-1 S(1)	2.248	0.22
8	FeII	1.644	0.16
9	Paschen-Beta	1.282	0.01
10	He I	1.083	0.01
11	CO (2-0 Bandhead)	2.295	0.02
12	Brackett-Gamma	2.166	0.02
13	Paschen-Gamma	1.094	0.11
14	OII	1.237	0.12
15	Continuum K	2.26	0.06

6) Trampa de adsorción: para incrementar el vacío y ayudar a eliminar los gases residuales que seguirán desprendiéndose por la desgasificación de las sustancias contaminantes que no se hayan podido eliminar durante el laborioso proceso de limpieza al que deben someterse todas las componentes internas de la botella, se utilizan adsorbentes, llamados también "getters", como

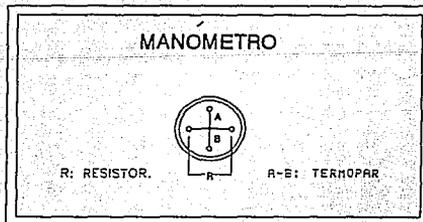
trampas para incrementar y prolongar durante mayor tiempo el vacío de operación del instrumento. Aquí utilizamos la "zeolita" que es un silicato metálico de aluminio. Para su utilización, éste debe ser previamente calentado a una temperatura de 280°C antes de introducirlo dentro de la botella, para después cerrar y comenzar los procesos de evacuación. Su eficacia se debe al inmenso número de poros que tienen estos cristales en sus caras (sus superficies al sumarles representan aéreas extraordinariamente grandes), por lo que al calentarlos y con ello incrementar sus diámetros por expansión, liberan el gas que se había introducido en esas pequeñas cavidades, y que al volverse a enfriar y cerrarse nuevamente atrapan los gases que llegan a ellos.

7) Tarjeta electrónica interior: Los voltajes de alimentación, así como las señales que requiere el detector para su funcionamiento, llegan del exterior a través de un conector militar de tipo cannon con 26 terminales. Ya en el interior de la botella son conducidos por cables coaxiales, que garantizan un buen blindaje, hasta la tarjeta electrónica interior que contiene la base del detector y varias componentes pasivas (principalmente filtros R-C). La tarjeta interior, además de permitir colocar estos filtros, hace posible interconectar las 68 terminales eléctricas que posee el detector, así

como recoger las señales producidas por éste y proporcionar un camino nuevamente hacia el exterior.

8) Manómetro ( termopar ): Para medir la presión interna dentro de la botella se utiliza un alambre de tungsteno al cual se le hace pasar una corriente controlada, en el centro va soldado un termopar que medie su temperatura (ver figura IV.3); los choques de las moléculas de aire con el alambre le irán enfriando de una forma proporcional al número de estos, eventos que a su vez son función de la presión, por lo que al disminuir ésta, su temperatura aumentará y con esta variación se calibra una escala que irá determinando el cambio de la presión interior.

Figura IV.3



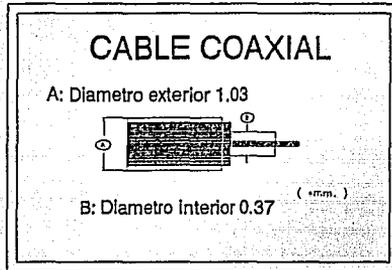
La botella criogénica fue diseñada y construida en colaboración con la Universidad de Massachusetts.

En los siguientes párrafos se mencionaran algunos de los problemas que se tuvieron que resolver y la forma como fueron solucionados.

Al ver la figura IV.1, podemos observar que el eje y soporte del carrusel de filtros presenta una protuberancia justo en el centro y arriba del área de trabajo, lo que limita el espacio interior para colocar al detector y la tarjeta electrónica. Después de contemplar y probar varias opciones, se decidió que la mejor se obtenía al colocar al detector en una posición paralela a la ventana exterior, y la forma de sujetarlo, junto con su base y la tarjeta electrónica, fue ejerciendo una presión directa por medio de unos muelles colocados entre el dedo frío y el marco que sujeta al baffle, el cual está fijo por medio de tornillos al área de trabajo, por lo que de esta forma se le puede enfriar también directa y eficientemente (de la misma forma como se hizo con el dedo frío).

La utilización de cables coaxiales es imprescindible, ya que las señales que se manejan son muy débiles y es necesario protegerlas hasta donde sea posible de cualquier fuente de contaminación externa. Pero a su vez, debemos tratar de no introducir calor del exterior a través de ellos, por lo que se utilizaron cables coaxiales de acero inoxidable con diámetros exteriores sumamente delgados como muestra la figura IV.4.

Figura IV.4



Las soldaduras entre acero inoxidable y cobre son difíciles, por lo que aquí se necesitó utilizar un fundente especial para ello. Los cables coaxiales están protegidos, para su manejo y limpieza, con una abrazadera metálica soldada al mismo conector de entrada.

El área sensible del detector es de  $2 \times 128 \times 40 \mu\text{m}$  ( $10.24 \text{mm}$ ), por lo que el dedo frío se construyó ligeramente mayor ( $13 \text{mm}$ ) para no tener gradientes térmicos pronunciados en los bordes, lo que limitó el número de pistas que podían colocarse en el interior de la base a dos por lado para cada cara de la tarjeta; sumando esto a que el ancho y largo total de ella no debía exceder los  $38 \times 88 \text{mm}$  para permitir

girar libremente al carrusel de filtros, dificultó el diseño y elaboración de la misma. Para pruebas preliminares en laboratorio se desarrolló primero con el programa "smART WORK Versión 1.3 r4" y su versión final con "OrCAD PCB II Versión 2.10B"; su diseño se realizó en el Instituto de Astronomía y los archivos "GERBER PhotoPlotter (2.3 format)" fueron enviados vía "Ethernet" a Estados Unidos para su fabricación. La calidad de su manufactura es sumamente importante para la confiabilidad del instrumento; sobre todo, debido a que los cambios tan intensos de temperatura inducen enormes esfuerzos mecánicos que debe soportar.

El diagrama de conexiones eléctricas y las señales que transmite esta tarjeta interior, se tratarán en el capítulo siguiente junto con el detector.

Capítulo 5.

La astronomía, como se mencionó en la introducción, cuenta actualmente con arreglos bidimensionales de detectores infrarrojos, que han venido a revolucionar las técnicas y alcances de las investigaciones en esta zona espectral.

Uno de ellos es el NICMOS-3, cuyo plano focal es una estructura híbrida que consiste de un multiplexor de silicio conectado a través de columnas de indio a un arreglo de más de 65,000 detectores individuales, los que están formados de fotodiodos compuestos por un implante de iones en una capa de HgCdTe<sup>1</sup> (mercurio-telurio de cadmio) crecido en un proceso epitaxial de fase líquida sobre un sustrato de zafiro.

La diferencia entre la banda de conducción y la banda de valencia, en los fotodiodos, se les deja para que respondan a la radiación infrarroja comprendida entre 1 y 2.5 $\mu$ m de longitud de onda.

---

<sup>1</sup>

Los hay también, por ejemplo: de PtSi (siliciuro de platino) o de InSb (antimoniuro de indio).

## EL "NICMOS-3" :

Su formato es un arreglo de 4 cuadrantes, de 128 X 128 elementos cada uno distanciados entre ellos  $40\mu\text{m}$ , siendo el área sensible del 90% y la eficiencia cuántica alrededor del 70%. Cada detector está conectado a un seguidor de voltaje en la celda de entrada del multiplexor, a través de una columna de indio, los que a su vez se pueden conectar a la salida de los amplificadores del multiplexor con unos interruptores que seleccionan las columnas y los renglones. Todos sus interruptores son de tecnología "CMOS FET" por lo que su consumo de corriente es muy bajo y con ello la generación de calor.

El barrido para cada cuadrante puede efectuarse independiente, simultánea y secuencialmente; ó en cualquier combinación deseada entre las formas antes mencionadas. El barrido en la lectura de las direcciones horizontal y vertical es independiente, por lo que no tienen que estar sincronizadas necesariamente. Inclusive, se pueden leer simultáneamente o mezclarse si se desea; la única restricción existente es que el barrido horizontal solamente podrá hacerse de izquierda a derecha y el vertical de arriba hacia abajo.

EL barrido se lleva a cabo por medio de dos registros de corrimiento. El registro de corrimiento vertical es un arreglo de 128 flip flops y el horizontal de 131. Cada uno de los cuadrantes cuenta con sus propios registros de corrimiento.

Las señales de control requeridas por el NICMOS-3 para su funcionamiento y algunas de sus formas de onda típicas son las mostradas en la tabla V.1 y figura V.1 respectivamente.

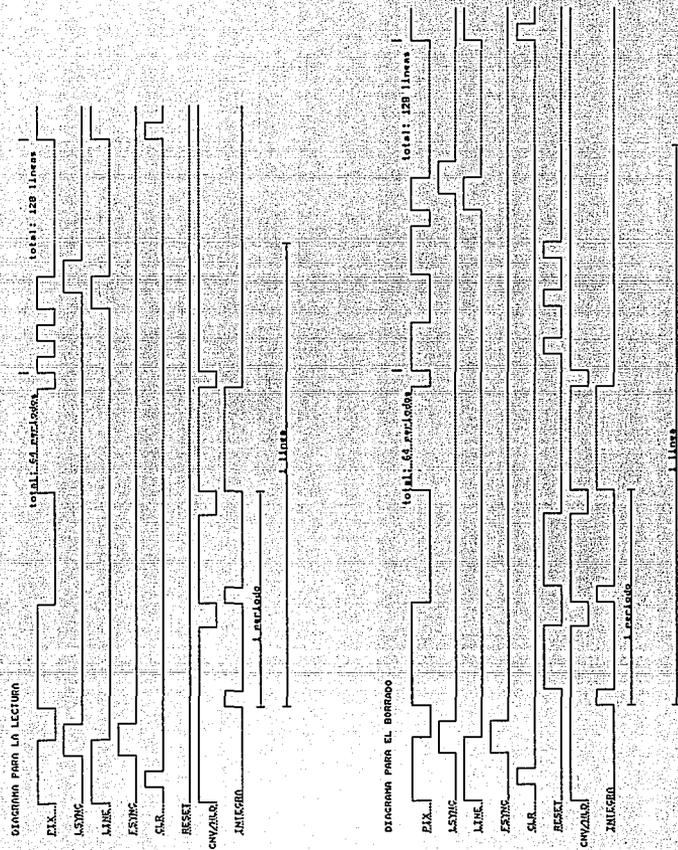
Tabla V.1

Señales de Control para el NICMOS-3

PIXEL	Reloj del registro de corrimiento horizontal
LINE	Reloj del registro de corrimiento vertical
LSYNC	Entrada del registro de corrimiento horizontal
FSYNC	Entrada del registro de corrimiento vertical
CLR	Borra la información asincrónicamente
RST	Reloj para borrar el pixel (cuando su valor se pone en alto "Hi")

Figura V.1

Diagramas de las señales de control.  
(Salidas del Micro-Contrólador).



Las señales de alimentación requeridas por el NICMOS-3 para su funcionamiento y sus valores típicos son los mostrados en la siguiente tabla:

TABLA V.2

Señales de Alimentación para el NICMOS-3

VDD	5 Volts dc
VSS	0 Volts dc
RHI 1 2 3 4	5 Volts dc
RLO 1 2 3 4	0 Volts dc
AHI 1 2 3 4	5 Volts dc
ALO 1 2 3 4	0 Volts dc
VD 1 2 3 4	5 Volts dc
LOAD (no se conecto)	0 Volts dc (ó abierta)
MIRROR 1 2 3 4	R de 100K a 0 Volts (ó abierta)
DET-BIAS	Alrededor de 0.5
GND	0 Volts dc
DETSUB	0 Volts dc

VDD y VSS son las alimentaciones para los circuitos de los registros de corrimiento. Estas están aisladas de las partes analógicas a través de un buffer.

AHI y ALO son las alimentaciones para los buffers de la selección de columnas, mientras que RHI y RLO lo son para los buffer de restablecimiento de renglón.

VD, LOAD y MIRROR son alimentaciones para la amplificación en la salida y también de los interruptores que seleccionarán individualmente al detector por columna después de haber sido determinado el renglón correspondiente.

DET-BIAS carga los capacitores en cada celda de entrada a su valor máximo inicial.

DETSUB es la referencia base para los detectores.

Los cuadrantes están eléctricamente aislados entre sí con excepción del potencial de tierra "GND" y "DETSUB" que son comunes para todo el detector.

Las señales de salida del NICMOS-3 para la lectura de la información registrada son:

TABLA V.3

Señales de Salida del NICMOS-3

TEMPD	no se habilitó
SOURCE 1 2 3 4	Señales de video analógicas
DRAIN 1 2 3 4	0 Volts dc

TEMPD puede servir para medir la temperatura sobre el detector si se hace pasar una corriente de aproximadamente  $10\mu\text{A}$  y se mide su voltaje.

Las señales de salida para cada cuadrante son enviadas al exterior de la botella por cuatro de los cables coaxiales mencionados en el capítulo anterior.

Dado que el costo de este tipo de detectores es muy elevado, todas las pruebas de la electrónica para la tarjeta interior se van desarrollando utilizando primero un dispositivo "ciego", este es un multiplexor completo que permite ir probando las conexiones y señales de control, pero sin arriesgar con ellas al verdadero detector. Para su funcionamiento no es necesario enfriarlo ni colocarlo dentro de la botella criogénica.

Posee cierta sensibilidad a la radiación visible, lo que lo hace muy práctico para ir haciendo los ajustes finos a la electrónica y tiempos para las señales de control al monitorear las imágenes captadas por éste, conforme se iluminan individualmente a los pixeles, a todo un cuadrante o cualquier zona deseada.

Después de varias pruebas sobre el diseño y de ajustes para los valores de las componentes, la electrónica de la tarjeta interior, con sus filtros RC y las resistencias para el polarizado de los ductos de salida, se dejó como se muestra en el diagrama de conexiones de la figura V.2.

Una vez probada esta tarjeta y sus conexiones con el exterior, se procedió después a comenzar las pruebas ya con un verdadero detector infrarrojo de calidad media (llamado de ingeniería), a éste si se le colocó dentro de la botella criogénica evacuada y enfriada a temperaturas de nitrógeno líquido.



La lista de las conexiones eléctricas asociadas al detector, se dejaron como muestra la tabla siguiente :

TABLA V.4

Lista de Terminales para el NICMOS-3

T E R	NOMBRE	T E R	NOMBRE	T E R	NOMBRE	T E R	NOMBRE
1	PIXEL4	18	FSYNC3	35	DETSUB	52	FSYNC4
2	LSYNC4	19	FSYNC2	36	LSYNC1	53	TEMPD
3	LSYNC3	20	LINE2	37	PIXEL1	54	LINE4
4	PIXEL3	21	ALO2	38	CLR1	55	ALO4
5	VSS3	22	AHI2	39	VSS1	56	AHI4
6	CLR3	23	DETBIAS2	40	RST1	57	DET BIAS4
7	RST3	24	SOURCE2	41	RLO1	58	SOURCE 4
8	RLO3	25	DRAIN2	42	RHI1/VDD1	59	DRAIN4
9	RHI3/VDD3	26	VD2	43	MIRROR1	60	VD4
10	MIRROR3	27	MIRROR2	44	VD1	61	LOAD4
11	VD3	28	RHI2/VDD2	45	DRAIN1	62	MIRROR 4
12	DRAIN3	29	RLO2	46	SOURCE1	63	VDD4
13	SOURCE3	30	RST2	47	DETBIAS1	64	RHI4
14	DETBIAS3	31	CLR2	48	AHI1	65	RLO4
15	AHI3	32	VSS2	49	ALO1	66	RST4
16	ALO3	33	PIXEL2	50	LINE1	67	GRND/ VSS4
17	LINE3	34	LSYNC2	51	FSYNC1	68	CLR4

Para documentar y disponer de una referencia clara de la forma como quedaron las conexiones entre el detector con su base, la tarjeta interior y sus componentes, así como de ésta con el conector, se muestran todas ellas en las figuras V.2 a la V.7.

Figura V.2

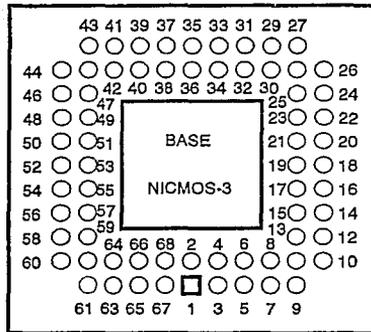
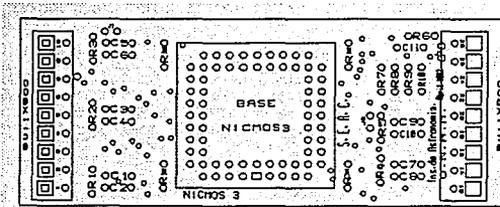


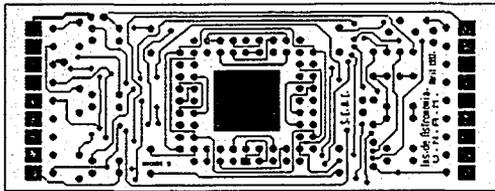
Figura V.3



Escala 1:1.

Máscara para componentes: en los extremos van soldados los cables coaxiales, y al centro se ve la base con las 68 terminales que soporta al detector.

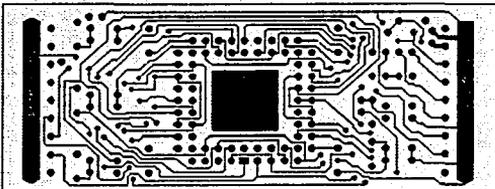
Figura V.4



Escala 1:1.

Lado de componentes (frente de la tarjeta interior).

Figura V.5



Escala 1:1.

Lado de soldadura (reverso de la tarjeta interior).

En ambas las zonas oscuras, al centro,  
corresponden al dedo frío.



Capítulo 6.

**P**ara facilitar las etapas de diseño, construcción y posteriormente su operación, el instrumento fue dividido funcional y físicamente según se muestra en la figura VI.1. En éste capítulo se describen las funciones e interconexiones entre las partes que lo integran.

Figura VI.1.

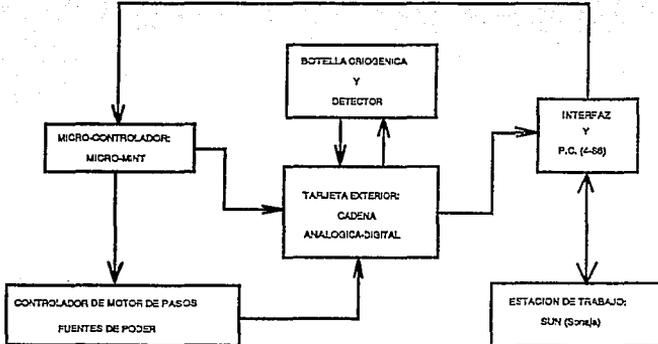


Diagrama a bloques del instrumento.

MICRO-CONTROLADOR (Micro-Mint):

Las tareas que realiza el micro-controlador son las siguientes:

- 1.- Secuenciador programable para las señales de control del detector.
- 2.- Manejo del motor de pasos.
- 3.- Comunicación con la computadora PC. (486 DX).
- 4.- Temporizador de la cadena analógica-digital.

La Micro-Mint es una tarjeta micro-controladora basada en un microprocesador 80C52, con un CPU de 8-bits optimizado para aplicaciones de control.

Dado que a esta tarjeta se le puede programar tanto con un lenguaje de alto nivel como el "BASIC" o en lenguaje ensamblador (propio del micro-procesador), resulta muy versátil si se desean efectuar cambios en las señales de control enviadas al detector y con ello modificar la forma

y tiempos en que se deseen realizar la lectura de la información contenida en los cuatro cuadrantes de éste. Los programas son híbridos, una mezcla de los dos tipos de programación, con lo cual se mantiene la facilidad de programar a alto nivel y las tareas que no se contemplan modificar están cargadas como datos directamente en lenguaje ensamblador, con lo que se reduce el tiempo de ejecución de los programas.

Para la comunicación entre la Micro-Mint y la computadora P.C. se utilizó una interfaz serial: RS-488; que es parecida al RS-232C, uno de los estándares más utilizados para comunicaciones entre computadoras y terminales, pero la utilizada permite la transferencia de información más rápido y posee también una alta inmunidad al ruido externo.

Las seis señales de control para el detector (Pixel, Line, Lsync, Fsync, Clr y Rst) salen de la tarjeta Micro-Mint por un puerto paralelo de 8-bits.

#### FUENTES DE PODER Y CONTROLADOR DEL MOTOR DE PASOS

Para la alimentación de la tarjeta Micro-Mint y el controlador del motor de pasos, se utilizó una fuente comercial de poder pulsada "OCTAGON", modelo 5101 con salidas de 5 y  $\pm 12$  Volts. Mientras que para la tarjeta

exterior, se utilizaron dos fuentes de poder de bajo ruido, "LAMBDA" series LND-Z (21 y 22), de  $\pm 5$  @ 60mA y  $\pm 15$  Volts @ 300mA. Sus características son las siguientes:

Voltaje regulado para la línea de entrada y de salida:

0.15% para variaciones en la entrada, desde 105 a hasta 132 Volts AC.

0.15 y 0.25% para variaciones en la carga, desde cero hasta su carga máxima.

Rizo y ruido: 1.5mV RMS, 5mV pico a pico.

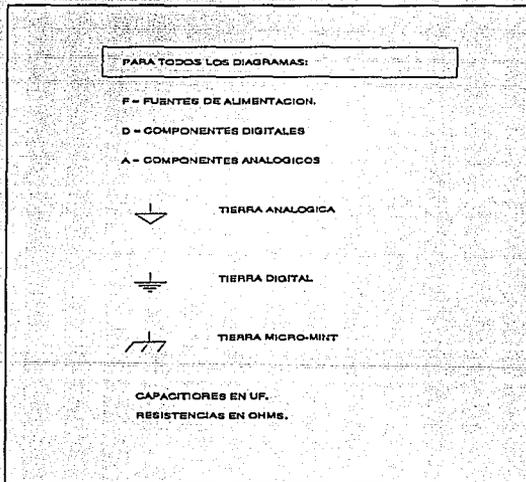
Coefficiente de temperatura: menor a 0.03%/°C.

Ambas además tienen protección a sobrecarga y su rango de temperaturas para operación continua es de 0 a +50°C.

El controlador del motor de pasos es a base de circuitos integrados que reciben directamente de la tarjeta micro-mint dos bits para su funcionamiento, después el controlador envía, sin pasar por la tarjeta exterior, los pulsos y voltajes que mueven al motor de pasos (colocado en el exterior de la botella criogénica) para poder seleccionar al filtro deseado.

TARJETA EXTERIOR:

La tarjeta exterior, además de tener las cadenas analógicas digitales, una para cada cuadrante del detector, contiene varios circuitos auxiliares que son presentados individualmente para hacer más clara su exposición y la comprensión del funcionamiento de los mismos.

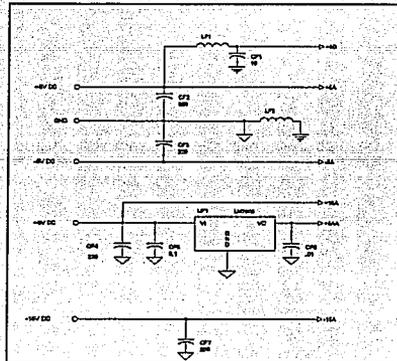
Figura VI.2.**DEFINICIONES ADOPTADAS**

(Las abreviaturas "A" y "AA" se refieren a voltajes).

### i) CIRCUITOS AUXILIARES

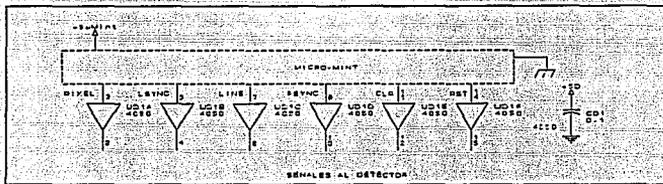
Los voltajes de alimentación, para la tarjeta exterior, llegan de las fuentes de poder a través del conector "J1", de donde se obtienen los voltajes para las partes analógicas y digitales de los circuitos. Todas las señales digitales, ya que son ruidosas, deben separarse de las señales analógicas; por lo que se puso especial énfasis en filtrarlas y separar físicamente tanto las componentes como las pistas de uno y de otro tipo. La manera en que se separan y filtran, además del regulador LM7805 usado para obtener un voltaje especialmente aislado y regulado (+5AA) para las señales VD y DET-BIAS puede apreciarse en la siguiente figura. Los filtros "LC" se utilizan para disminuir fuentes de ruido por interferencia.

Figura VI.3.



Las seis señales de control para el detector salen de la tarjeta Micro-Mint por un puerto paralelo de 8-bits. Llegan al conector "J3" (de tipo 3M) de la tarjeta exterior en la cual cada señal pasa por un buffer 4050 (que sirven para proteger las salidas de la micro-mint) y salen con la tierra digital por el conector "J2" (de tipo 3M) hacia la botella criogénica (figura VI.4.).

Figura VI.4.



Los dos bits restantes así como las señales de otro puerto paralelo son utilizadas para manejar procesos de control de las etapas de amplificación y conversión analógica-digital (figura VI.5).

Figura VI.5.

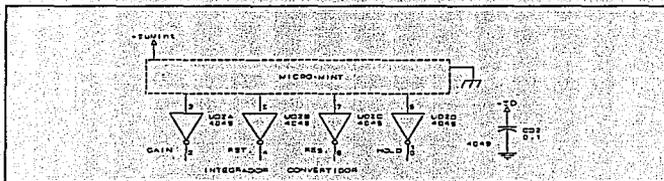
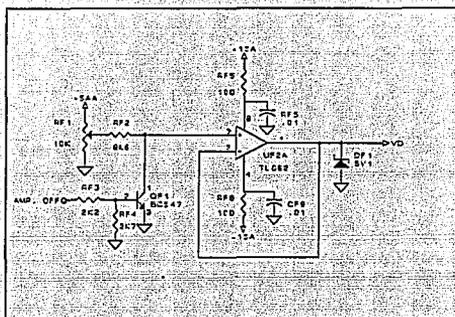


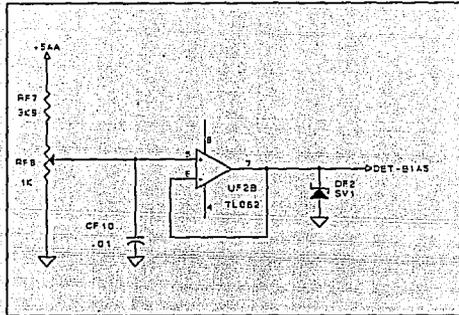
Figura VI.6.



EL voltaje VD requerido para la alimentación de los transistores de salida del detector, se obtiene del circuito mostrado en la figura VI.6, con el potenciómetro RF1 y la resistencia RF2 formamos un divisor de voltaje que está conectado a un buffer TL082 (dando una impedancia de entrada grande y por lo que prácticamente no se modifica el voltaje de entrada), su salida VD es enviada a la botella criogénica por medio de un cable coaxial.

El transistor BC547 permite, al operarlo como un interruptor entre la entrada del buffer y tierra, interrumpir VD cuando la señal AMP-OFF enviada por la Micro-Mint sea recibida, permitiendo con ello tener encendidos los transistores de salida únicamente cuando se necesiten. El diodo zener, entre la salida del buffer y tierra, proporciona una protección adicional para que el voltaje de la señal no pueda llegar a valores que puedan ocasionar daños físicos al detector.

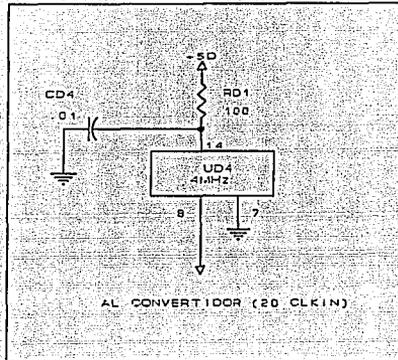
Figura VI.7.



Para reinicializar los capacitores de cada una de las celdas de entrada del detector, se cargan éstos a su valor máximo preestablecido utilizando el circuito de la figura VI.7. Con el arreglo de la resistencia (RF7) y el potenciómetro (RF8), podemos variar el voltaje desde 0 a 1 Volts, divisor que está conectado a un buffer TL082 (utilizado de la misma forma que para la señal VD), con lo que obtenemos la señal DET-BIAS que es enviada a la botella criogénica por medio de un cable coaxial.

El circuito tiene a la salida también un diodo zener utilizado como protección.

Figura VI.8.

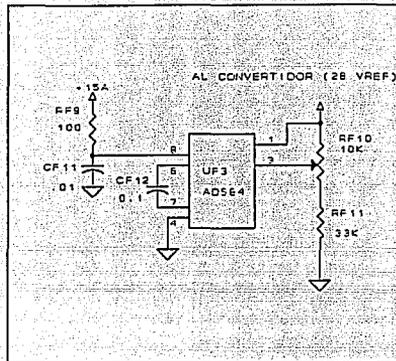


Para disminuir los tiempos en los ciclos de conversión de las cadenas analógicas digitales, preferimos utilizar un reloj externo (figura VI.8) del doble de frecuencia (4MHz) del que traen internamente cada uno de los convertidores. Este reloj es compartido por todos los cuadrantes.

Algunas de sus especificaciones son las siguientes:

- Oscilador "Mouser" TTL de 4MHz.
- Tiempos máximos de subida/bajada 10nS.
- Estabilidad en la frecuencia  $\pm 30\text{ppm}$  (a 25 °C).
- Voltaje de alimentación +5Vdc.
- Consumo de corriente 60mA máximo.
- Rango de temperatura para uso continuo: de 0 a 70°C.

Figura VI.9.



Se utilizó externamente, también para los cuatro convertidores, una fuente de voltaje de precisión programable AD584 (figura VI.9), sus voltajes de salida pueden ser 2.5000V, 5.000V, 7.5000V y 10.000V; si se requiere cualquier voltaje intermedio se puede obtener utilizando resistencias o potenciómetros adicionales.

Algunas características del AD584 son:

Tolerancia en la salida de  $\pm 7.5$  a  $\pm 30\text{mV}^*$ .

$\Delta V$  máximo en la salida de 30ppm (a  $25^\circ\text{C}$ ).

Ruido (0.1 a 10Hz)  $50\mu\text{V}$  p-p.

Corriente ( $V_{\text{IN}} > V_{\text{OUT}} + 2.5\text{V}$ ) de 5 a  $10\mu\text{A}^*$ .

Rango de temperatura para uso continuo: de  $0$  a  $70^\circ\text{C}$ .

---

\* dependiendo del voltaje programado (quedó alrededor de 4.9V).

ii) CADENA ANALÓGICA DIGITAL

La parte medular de la tarjeta exterior son las cadenas analógicas digitales, que sirven como su nombre lo indica, para convertir las señales analógicas provenientes del detector en información digital para poder posteriormente ser procesada y almacenada en una computadora.

Las electrónicas correspondientes a cada cuadrante se dejaron independientes entre sí y las etapas seguidas en el proceso de conversión son las siguientes <sup>1</sup>:

Primero, las salidas individuales del detector que llegan por cables coaxiales a la tarjeta exterior, pasan por un filtro pasa bajos pasivo, constituido por RA1 y CA1, de donde entran al preamplificador UA1 (Op-Am: Op37) de muy bajo ruido, 80nV p-p para 0.1Hz a 10Hz y  $3nV/\sqrt{Hz}$  a 1kHz; la retroalimentación de voltaje se obtiene con el potenciómetro RA5 en paralelo con el capacitor CA4.

Algunas otras de las características del Op37 son:

Rapidez: 17V/ $\mu$ S.

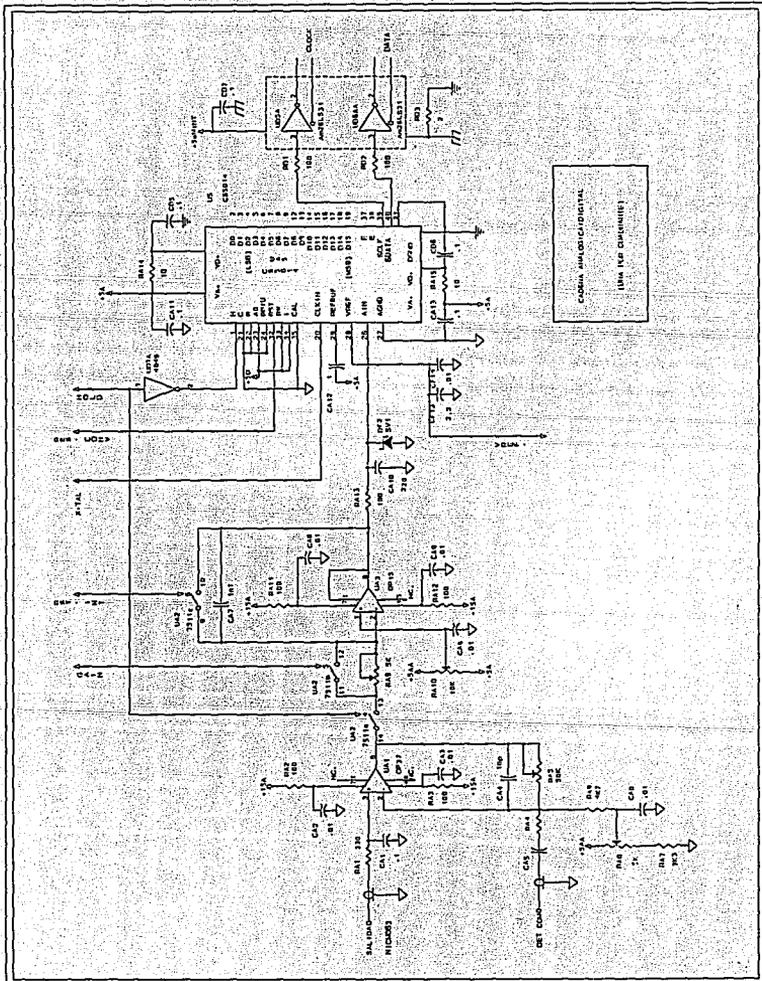
Producto ganancia ancho de banda: 63MHz.

Producto de rechazo de modo común (CMRR): 126dB para un intervalo de  $\pm 11V$  en la entrada.

1

Todas las componentes referidas en esta sección pueden localizarse en el diagrama esquemático de la figura VI.10 ó directamente sobre la mascarilla de componentes de esta tarjeta (figura VI.11).

Figura VI.10

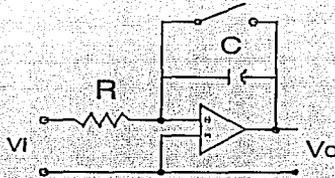


El potenciómetro RA5 y el capacitor CA4 regulan la ganancia selectiva del preamplificador, ya que RA5 retroalimenta principalmente la componente DC de la señal, mientras que el capacitor CA4 para frecuencias altas actuará parecido a un corto entre sus terminales y por lo tanto la ganancia en éste será relativamente baja.

Adicionalmente el amplificador puede estar conectado a la entrada DET-COM con la cual podemos traer, desde la botella criogénica, la tierra analógica de la tarjeta interior si lo deseamos y con el potenciómetro RA7 podemos variar el nivel de referencia base en su entrada "offset del amplificador".

Ya una vez amplificada la señal como se mencionó anteriormente, ésta llega a un integrador formado por el OP-AM: Op15 y el capacitor CA7. El potenciómetro RA9 y el interruptor 7511b (manejado por la señal GAIN de la Micro-Mint) que están en paralelo a la entrada del integrador nos permiten seleccionar una ganancia alta ó baja en el integrador. Mientras que con el potenciómetro RA10 que está conectado a la entrada no inversora podemos variar el "offset" en el mismo.

En UA2, el interruptor 7511c, manejado por la señal de la Micro-Mint "RST.INTEGRADOR", permite restablecer nuevamente al integrador cuando descarga al condensador CA7 poniendo en corto sus terminales; mientras que la señal "HOLD" habilita el 7511a para conectar o desconectar la entrada en el integrador.

Figura VI.11

Sabemos que para un circuito integrador como el anterior, figura VI.12, en su entrada inversora tendremos que se cumple:

$$C \frac{d}{dt} V_o + \frac{V_i}{R} = 0 \quad (\text{Ec.VI.1})$$

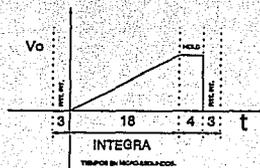
por lo tanto, el voltaje a la salida será:

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_i(\xi) d\xi + cte \quad (\text{Ec.VI.2})$$

en donde la constante será el valor de  $V_o$  para  $t=0$  y su gráfica para  $V_i=DC$  constante sería:

Figura VI.12

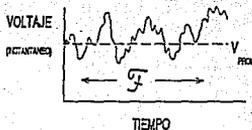
Gráfica del Integrador y las señales de control necesarias enviadas por la micro-int.



Lo importante de hacer una integración de la señal, es que con ello podemos promediar la señal para intervalos definidos de tiempo, con lo que se reduce el valor RMS del ruido en relación con la señal "DC" que nos interesa; también evitamos que los valores de la señal leídos por el convertidor puedan estar en ese momento sobre fluctuaciones no representativas y por ende, estemos leyendo primordialmente el ruido presente. Además, al dejar de integrar y mantener fija la salida del integrador entregamos al convertidor una señal estable durante el tiempo necesario que éste la requiere en sus procesos de conversión.

Aquí es importante señalar que la parte de la señal proveniente del detector que nos interesa amplificar, es fundamentalmente "DC" y las componentes de frecuencias altas son debidas a los ruidos mencionados en el capítulo 3 superpuestos a la señal, sumándose además los ruidos introducidos al operar los interruptores necesarios para transferir la señal del detector hasta el preamplificador.

Figura VI.13



Es importante disminuir la razón señal a ruido:

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{V_s^2}{V_n^2} \right) \text{dB} \quad (\text{Ec. VI. 3})$$

por lo que se emplean varias técnicas <sup>2</sup>.

La primera es haciendo varias lecturas no destructivas en el detector con lo que se incrementan los tiempos de integración en las celdas de entrada y con ello el número de conteos en las observaciones, lo que da por resultado que la amplitud de la señal y el ruido de fondo crezca proporcionalmente al tiempo, pero las fluctuaciones de éste crecen sólo como la raíz de t, por lo que la razón señal a ruido mejora como la raíz del mismo.

En la amplificación y posteriormente en la integración de la señal analógica al utilizar técnicas de amplificación de bajo ruido en la primera y el estrechamiento del ancho de banda producido por la segunda se mejora también la razón señal a ruido.

Aunque la señal deseada es fundamentalmente "DC", los filtros pasabajos a la entrada del amplificador ayudan muy poco, ya que en esta zona también tenemos contribuciones de ruido que van como 1/f, por lo que en la entrada es más importante tener resistencias de entrada pequeñas para disminuir el ruido de Johnson.

---

<sup>2</sup> Para dos señales de ruido no correlacionado  $V_s$  y  $V_n$  se tiene que:  
 $V_{(RMS)} = \left( (V_{s(RMS)})^2 + V_{n(RMS)}^2 \right)^{1/2}$ , por lo tanto, el valor de sus amplitudes al cuadrado se pueden sumar, pero no así a sus amplitudes.

Por otro lado, con el circuito integrador, se "acumulan datos" para la señal analógica, lo que da por resultado una distribución más uniforme del ruido para el ancho de banda  $\Delta f = 1/t$ , que para un tiempo de  $18\mu s$  nos da alrededor de  $55 \times 10^3$  cps, mejorando con ello un poco más la razón señal a ruido.

Para la conversión de la información analógica a una ya digital, utilizamos un convertidor "CMOS" de 14 bits CS5014 que en lugar de los arreglos tradicionales de resistencias implementa sus aproximaciones utilizando una redistribución de carga en un arreglo de capacitores, tiene salidas en serie y paralelo y posee un circuito de autocalibración para mantener la precisión a lo largo del tiempo y de cambios de temperatura. A su entrada AIN colocamos un filtro pasa bajos formado por RA13 y CA10, así como también al zener DF2 para proteger a la misma de voltajes arriba de 5 Volts.

El CS5014 tiene internamente un reloj de alrededor de 2MHz que se activa simplemente al poner la entrada CLKIN a DGND (tierra digital), pero la frecuencia en general varía de unidad a unidad por lo que preferimos sincronizarlo con un reloj externo TTL de 4MHz, para lo que basta con poner la misma entrada CLKIN a la señal del reloj externo, en nuestra tarjeta los cuatro cuadrantes comparten al reloj como ya lo mencionamos anteriormente.

Para que el convertidor realice sus algoritmos de aproximaciones sucesivas, requiere de una referencia de

voltaje de alta precisión, ésta proporciona únicamente la carga residual para terminar de cargar el arreglo de capacitores que son precargados por "buffers" internos del mismo convertidor, y por ello se recomienda poner un capacitor como filtro entre las entradas de la referencia VREF y la tierra analógica AGND. La referencia también define el rango de los voltajes de entrada que pueden ser: bipolar  $\pm VREF$  ó unipolar de AGND hasta VREF ésto se controla con las entradas BP/ $\overline{UP}$ . Nosotros lo dejamos entre 0 y 4.9Volts, y se utilizó como mencionamos anteriormente, una sola referencia para los cuatro convertidores.

La señal " $\overline{HOLD}$ ", enviada por la Micro-Mint y negada por una de las compuertas de un 4049 (UD3A), en su transición de caída coloca al CS5014 en su estado "hold" donde tomará el voltaje en la entrada AIN para ser convertido e inicializará el proceso de conversión; esta señal debe permanecer durante un ciclo del reloj maestro, que se obtiene al integrar un voltaje nulo al desconectar la entrada en el integrador durante este intervalo.

Las salidas que utilizamos fueron sus salidas en serie SDATA y SCLK, en la primera aparece el bit inmediatamente en cuanto el algoritmo de aproximación lo determina, permaneciendo válido durante el tiempo de subida de la salida SCLK, la información va saliendo del "bit" más significativo al de menor peso.

Algunas de las características del CS5014 son:

Error de linealidad:  $\pm \frac{1}{4}$  LSB.

(desviación a una línea recta que pasa por los extremos de su función de transferencia)

Ajuste total de error:  $\pm 1$  LSB.

Baja distorsión:

Distorsión armónica total: 0.003%

(razón entre la suma RMS de todos los armónicos y el valor RMS de la señal).

---

Finalmente, para poder llevar la información digital de los convertidores desde la TARJETA EXTERIOR hasta la INTERFAZ, por estar separadas una distancia de casi 10 metros, se decidió transmitirla después de amplificar diferencialmente sus salidas, para lo que se utilizaron los "drivers" diferenciales LS31; que tienen además de protección a corto circuito en sus salidas, capacidad para tener conectadas cargas con impedancias tan bajas como 100 $\Omega$ . Los cables utilizados fueron de pares trenzados ("twisted pair") para prevenir la contaminación debida a la interferencia causada por inducción externa o autoinducción entre los mismos.

iii) CIRCUITO IMPRESO

Para todas las pruebas preliminares en laboratorio, se acostumbra utilizar prototipos armados sobre tablillas de pruebas, lo que facilita el intercambiar componentes conforme se van desarrollando cada una de las diferentes etapas. Sin embargo, el mejor método para construir un circuito electrónico de alta calidad y confiabilidad, cuando está listo para su etapa operativa, es empleando un circuito impreso.

Aunque a diferencia de la tarjeta interior no habían limitaciones de tamaño, se decidió hacerla lo más compacta posible para minimizar sus longitudes y poder colocarle dentro de un gabinete metálico pequeño que además de ser un blindaje para interferencias externas, se pudiera fijar por medio de cinturones metálicos a la botella criogénica para que quedaran como de una sola pieza y así facilitar su montaje en la platina del telescopio como se podrá apreciar en las fotografías incluidas en el capítulo 7.

En las siguientes páginas se muestran:

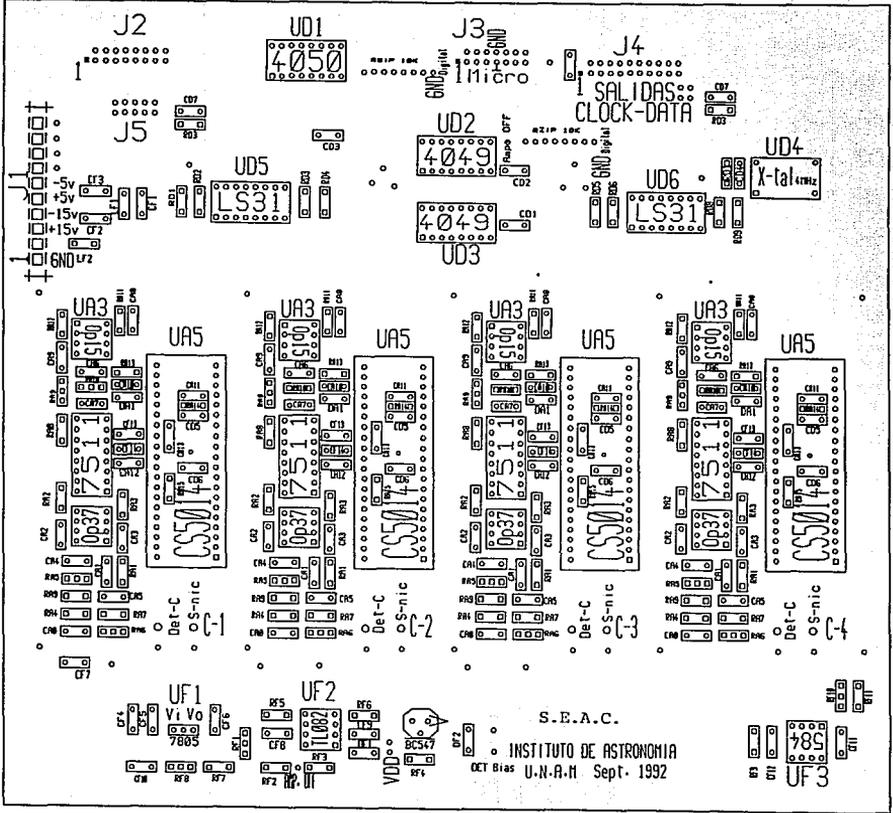
- 1) La mascarilla para identificación de las componentes (figura VI.14) \*.

2) El frente de la tarjeta que corresponde al lado de componentes (figura VI.15) \*.

3) Reverso de la tarjeta que corresponde al lado de soldadura y planos de tierra (figura VI.16) \*.

---

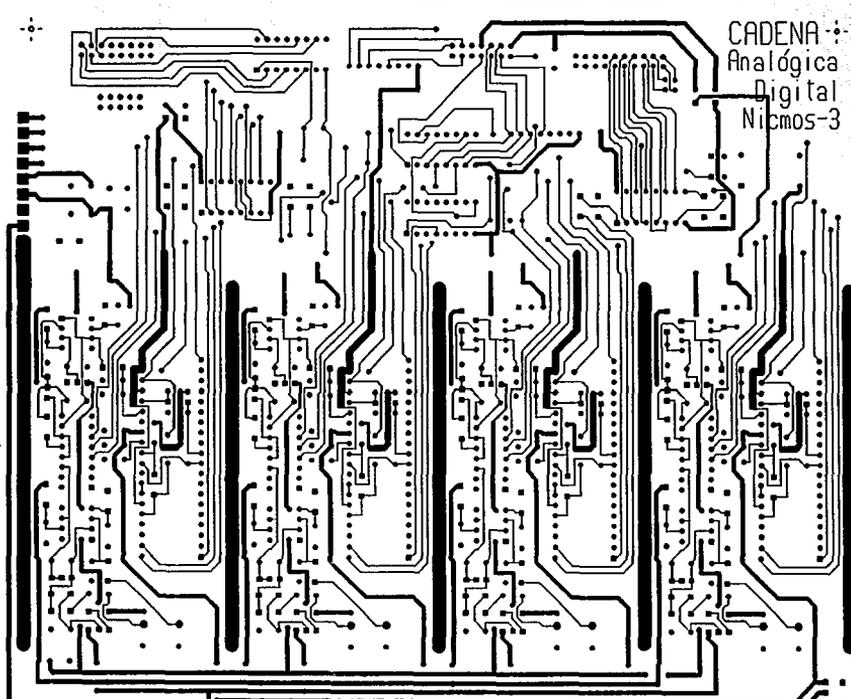
\* Para su desarrollo se utilizó el programa ORCAD PCB II.



S. E. A. C.

INSTITUTO DE ASTRONOMIA  
 U. N. A. M. Sept. 1992

CADENA  
Analógica  
Digital  
Nimcos-3

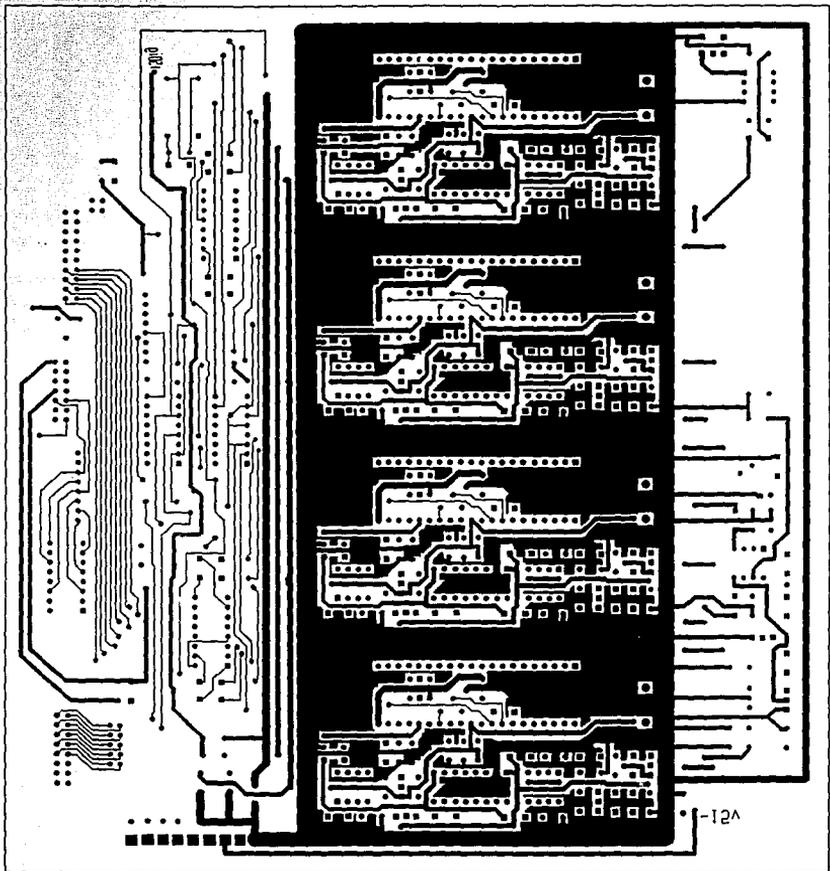


+15v

Vref

S.E.A.C.  
INSTITUTO DE ASTRONOMIA  
U.N.A.M. Sept. 1992

Figura VI.16



Escala 1:1.2

INTERFAZ, PC. Y ESTACIÓN DE TRABAJO:

La Interfaz nos permite establecer las conexiones entre la salida y entrada de información entre diferentes tipos de equipos y señales, como son las señales de los convertidores A/D, de la tarjeta exterior, hacia una computadora PC. 486DX a 33MHZ que utilizamos para diversas tareas: como una memoria muelle, para enviar ordenes a la tarjeta Micro-Mint (por la interfaz RS-488), para hacer algunos preprocesamientos de datos y además nos permite tener al equipo conectado, via ethernet, con la estación de trabajo "S U N" (sonaja) en donde se despliegan las imágenes del detector o se procesa la información de diversas formas.

Por la tanto, gracias a estas computadoras y sus interconexiones el usuario puede, cómodamente desde la estación de trabajo (Sonaja), manejar el instrumento enviando comandos remotos para las diversas funciones que se deben realizar para efectuar una observación.

Algunos ejemplos de éstas tareas serían :

Seleccionar el número de filtro deseado.

Seleccionar la ganancia alta o baja en los preamplificadores.

Pedir la autocalibración a los convertidores A/D.

Inicializar los convertidores y apagar o encender los preamplificadores.

Habilitar o deshabilitar las interrupciones en las conexiones via "ethernet" para ciertos procesos.

Leer o modificar los parámetros para una integración.

Inicializar el "hardware" para la adquisición o transferencia de datos.

Inicializar el registro de control de la interfaz.

Escribir en alguno de los discos los datos leídos.

Procesar la información, hacer análisis estadísticos de ésta y crear los archivos correspondientes.

Así como también desplegar las imágenes en pantalla, obtener gráficas e histogramas, etc..

Algunas de estas gráficas, histogramas y el despliegue de una de las imágenes del detector se presentan junto con los resultados y conclusiones.

## Capítulo 7.

### Resultados y Conclusiones.

Después de los procesos de diseño, pruebas de laboratorio y de la fabricación de cada una de las partes del instrumento, finalmente se ensamblaron todas ellas y se unieron con la estación de trabajo (sonaja), con lo que se completo la cámara infrarroja directa.

El instrumento se acopló a la platina del telescopio de 2m del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir B.C., con una montura especialmente diseñada para éste fin y con ello se hicieron las primeras pruebas de todo el equipo en su conjunto.

Los resultados y avances hasta la fecha son esencialmente los siguientes:

Por el momento tenemos una cámara infrarroja directa a  $f/13$  funcionando, las componentes ópticas y mecánicas adicionales que están proyectadas para un futuro, están apenas en su fase de diseño ó construcción, pero permitirán dos o tres relaciones focales adicionales.

Los programas, así como las computadoras para la adquisición, manejo y procesamiento de imágenes ya están trabajando adecuadamente haciendo los procesos que tienen implementados por el momento, por lo que ya fue posible hacer las primeras observaciones astronómicas. El reporte de resultados preliminares de la temporada abril 1993 (utilizando el detector de ingeniería) indica que la no linealidad en el instrumento es de 20% a 5000 conteos, 30% a 7000 y alrededor de 50% a 10000 conteos, por lo que es necesario hacer al menos una corrección de segundo orden:

$$\text{conteos corregidos} = \text{cont} * (\text{a1} + \text{a2} * \text{cont})$$

con  $\text{a1} = 0.95$

y  $\text{a2} = 5.5 \times 10^{-5}$

para obtener una corrección al 3%.

Lo que no es muy satisfactorio y se propone que sea corregido en tiempo real.

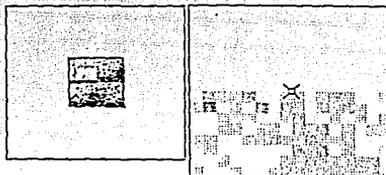
Reporta también que buena parte del ruido de lectura es introducido principalmente durante el borrado del detector.

Se midió la sensibilidad a partir del número de fotones esperados para una estrella de magnitud 7.3 en K', fuera de la atmósfera y se encontraron valores parecidos a los que tienen los sistemas europeos ESO.

FIGURA VII.1

Imagen del detector de ingeniería.

m82bcama -  
(IRAF)



1505 2565 4008 408

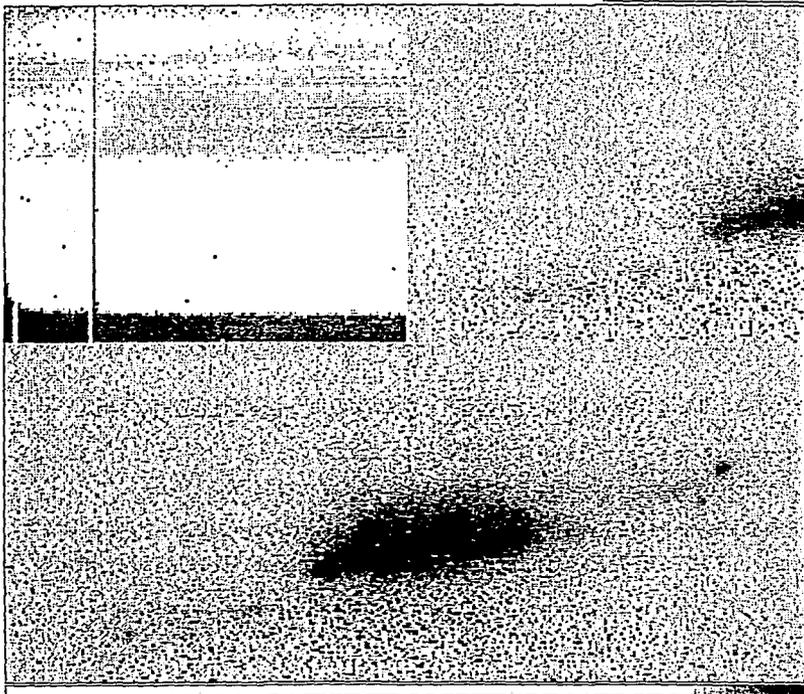
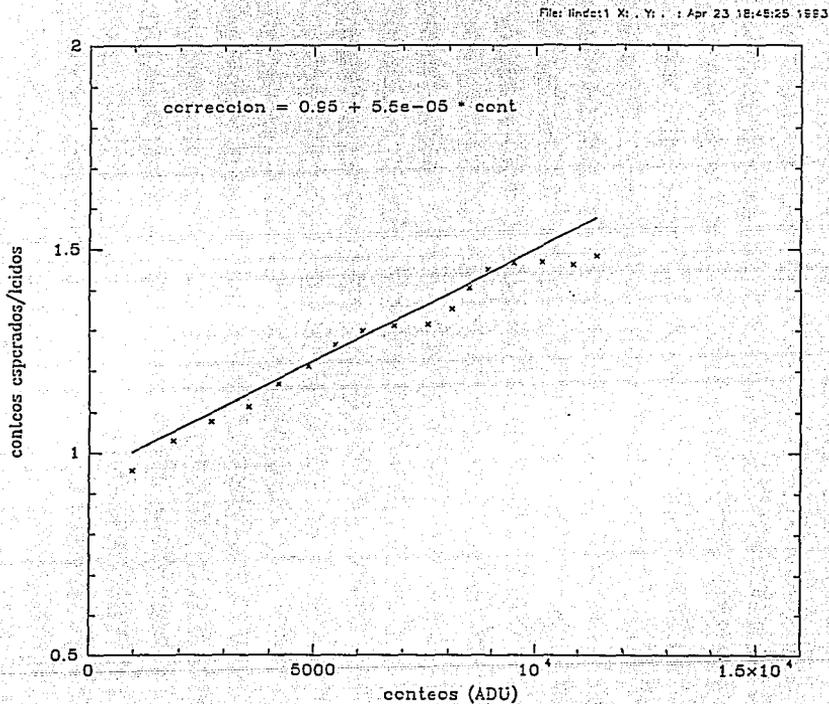


FIGURA VII.2

Gráfica de linealidad (detector de ingeniería).



En estos últimos días se colocó el detector de calidad científica, que muestra muy pocos pixeles malos y una uniformidad mucho mayor. Con esto se podrá comenzar el trabajo necesario para caracterizarlo y dejar listo el instrumento para que ya pueda ser utilizado cotidianamente en la investigación astronómica infrarroja.

Resumiendo, las características más sobresaliente de la cámara infrarroja directa que construimos son:

Se utiliza un detector "Nicmos-3" ( CID de Hg:Cd:Te).  
De 4 cuadrantes de 128x128 pixeles cada uno.

Facilidad de hacer lectura simultanea para los 4 cuadrantes.

Con un tamaño por pixel de  $40\mu\text{m}$  y una área sensible de un 90%.

La eficiencia cuántica es aproximadamente del 70%.

La corriente oscura está en 55 e/seg.

Su intervalo espectral comprende de 1 a  $2.5\mu\text{m}$ .

Tenemos un ruido de lectura alrededor de 60 electrones (RMS por pixel).

Los Intervalos de tiempos de exposición mínimo es de 0.4 seg. y el máximo de 1 hora.

Contamos con preamplificadores de muy bajo ruido con ganancias ajustables de 10 ó 200 e ADU.

Ancho de banda de  $55 \times 10^3$  cps.

Y por los convertidores Analógicos Digitales de 14 bits, la resolución es de 1 parte en 16K.

En las siguientes páginas se incluyen varias fotografías <sup>1</sup> que permiten ver algunos detalles de las partes que componen al instrumento.

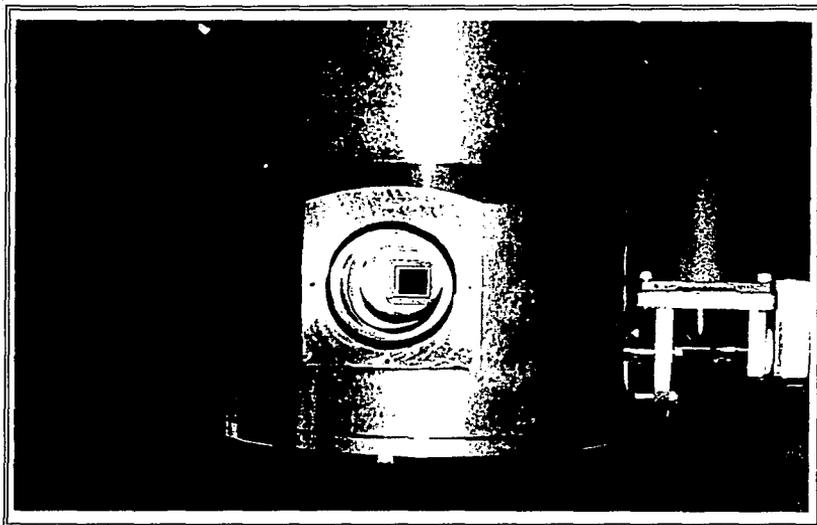
En los apéndices I y II se muestran: la corriente oscura en función de la temperatura y algunos resultados preliminares de las pruebas de calibración y linealidad del detector científico <sup>2</sup>.

---

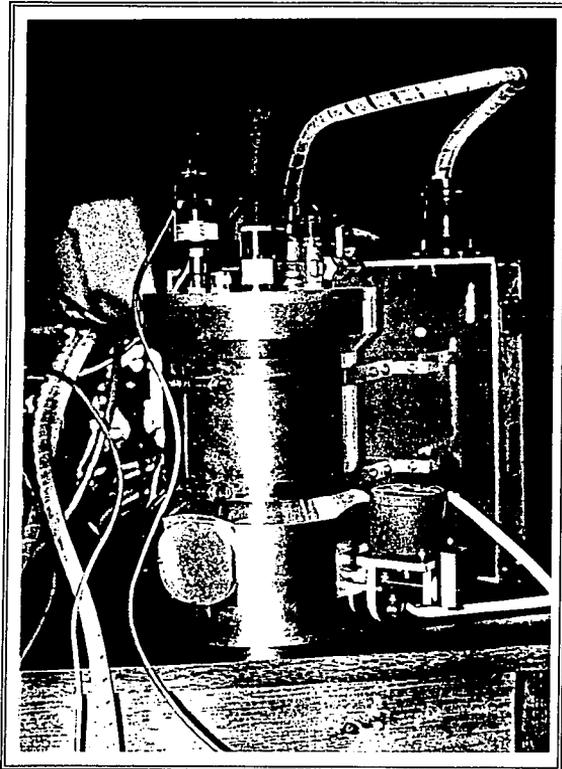
<sup>1</sup> Fotografías tomadas por Leonel Gutiérrez.

<sup>2</sup> Las Figuras VII.1 y 2: son del reporte preliminar de la temporada de observación y pruebas de abril de 1993.

Figura VII.3

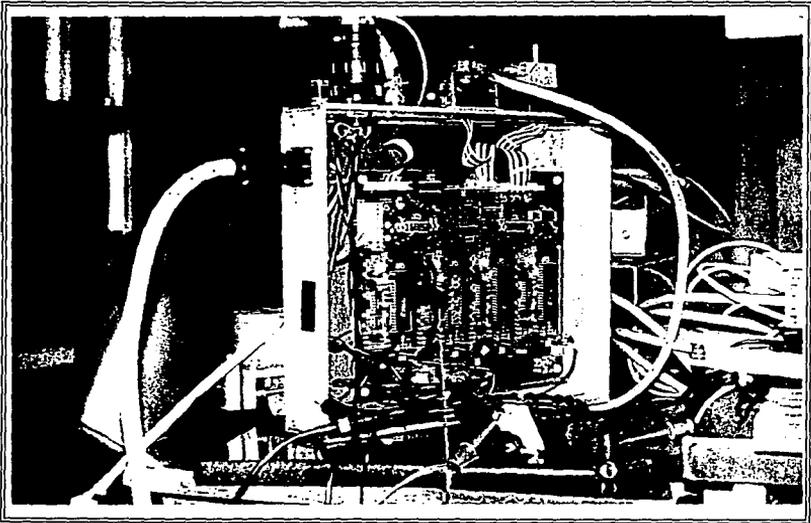


Ventana de la Botella Criogénica, Detector y Motor de Pasos.

Figura VII.4

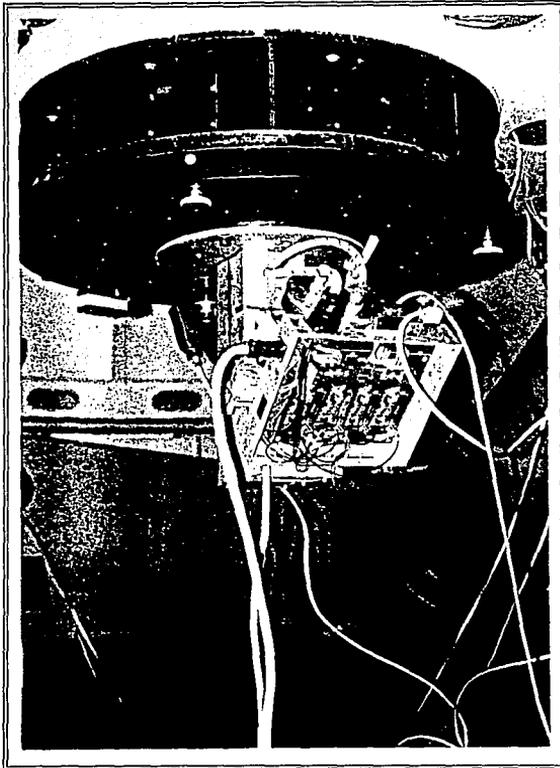
Botella Criogénica y Gabinete de la Tarjeta Exterior.

Figura VII.5



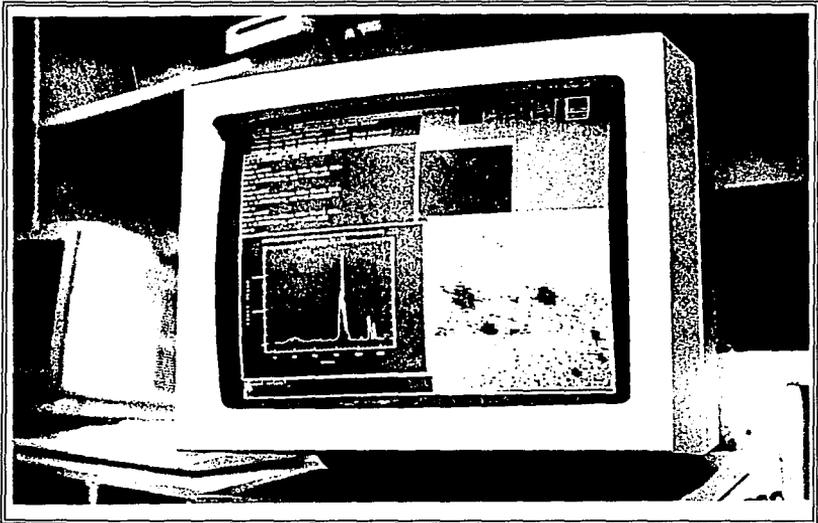
Tarjeta Exterior con sus Conexiones de Entradas y Salidas.

Figura VII.6



Equipo ya montado a la Platina del Telescopio.

Figura VII.7



Despliegue de una Imagen en la Estación de Trabajo.

**Lista de Apéndices contenidos:**

**APÉNDICE I: página 120.**

**Corriente oscura en función del tiempo.**

**APÉNDICE II: páginas 121, 122 y 123.**

**Pruebas de calibración, linealidad y saturación**

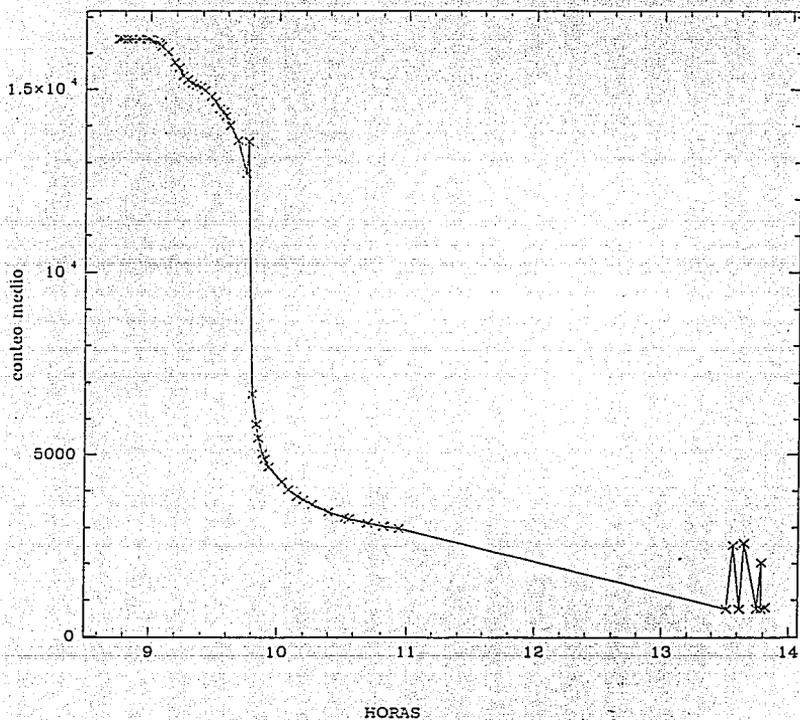
**APÉNDICE III. página 124.**

**Tabla Comparativa de Detectores.**

## APÉNDICE I.

Corriente oscura en función del tiempo.

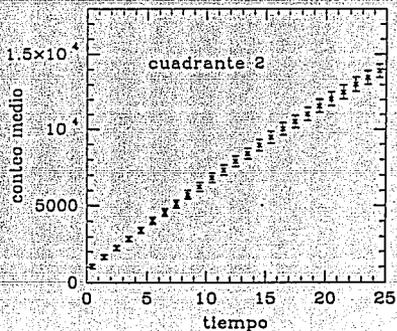
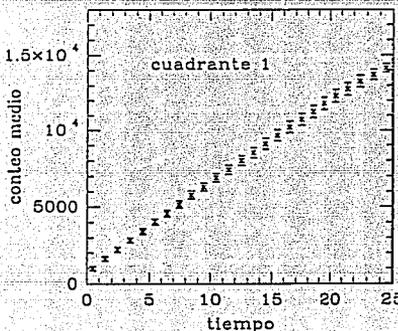
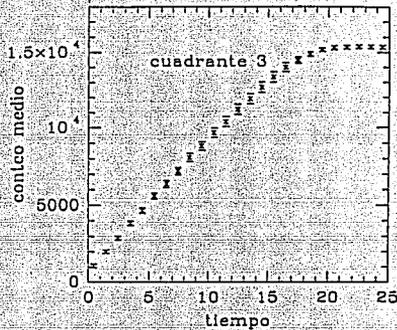
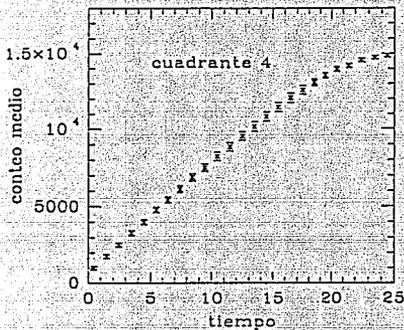
File: Ufrío XI : Y. : Jun 10 17:05:54 1953



## APÉNDICE II (1).

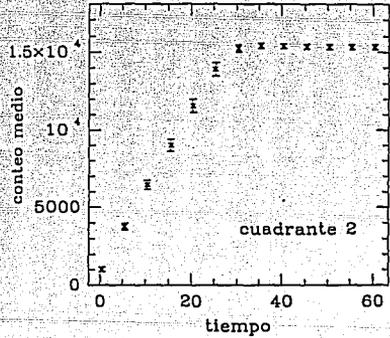
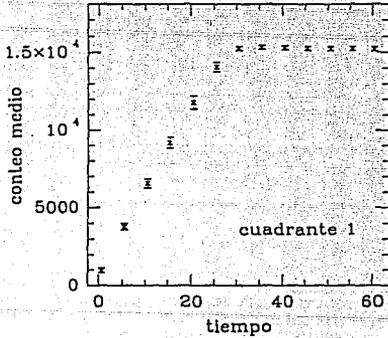
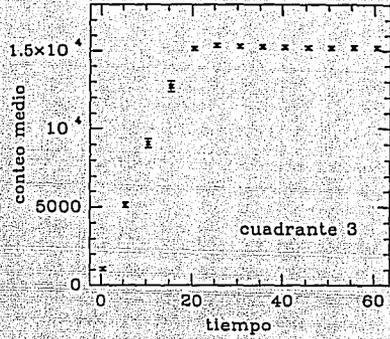
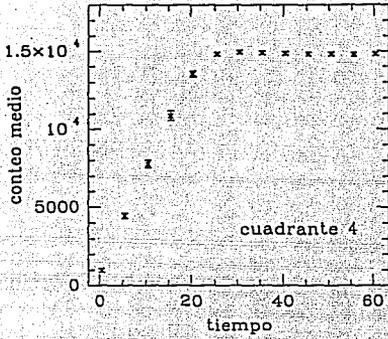
Pruebas de calibración, linealidad y saturación.

File: detlin3 X: . Y: . : Jun 10 18:30:34 1993



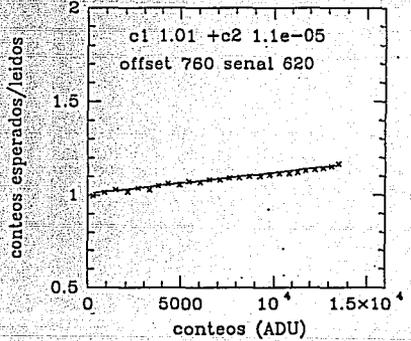
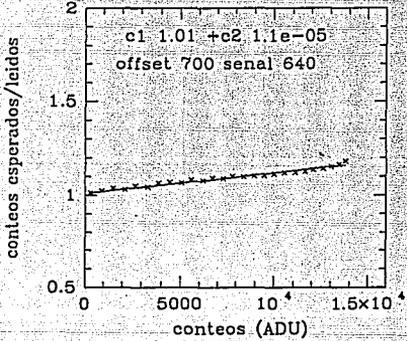
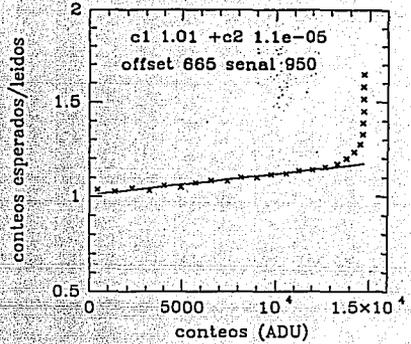
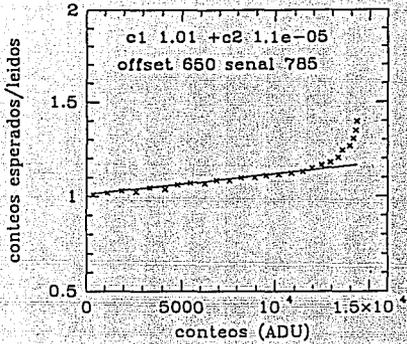
## APÉNDICE II (2).

File: dot2lin3 X: . Y: . : Jun 10 18:47:22 1993



## APÉNDICE II (3).

File: datlin4 Xi . Y. : Jun 11 18:49:09 1993



## APÉNDICE III.

Tabla Comparativa de Detectores.

<u>DETECTOR TÉRMICO</u>	TEMP. °K	INTERVALO. ( $\mu\text{m}$ )	$D^*$ . ( $\text{cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ )	RESPUESTA ( $\mu\text{s}$ )
TERMISTOR	300	1-40	$5 \times 10^8$	100
CELDA DE GOLAY	300	1-2000	$1.5 \times 10^9$	15000
TERMOCOPLE	300	> 1	$1 \times 10^9$	10000
BOLOMETRO Ge	2.0	> 10	$1 \times 10^{12}$	10000
BOLOMETRO C	2.0	> 10	$4 \times 10^{10}$	1000
<u>DETECTOR CUANTICO</u>		para $\lambda$	$D^*(\lambda)$	
Si	300	0.9	$5.6 \times 10^{13}$	
Si	300	0.9	$6 \times 10^{12}$	$10^{-2}$
Si	300	1.6	$4 \times 10^{11}$	0.2
Ge	300	2.4	$1 \times 10^{11}$	1000
PbS	300	2.8	$5 \times 10^{11}$	300
PbS	193	3.8	$3 \times 10^{10}$	3000
PbSe	300	4.8	$2 \times 10^{10}$	2
PbSe	193	5.0	$2 \times 10^{10}$	30
PbSe	77	3.4	$7 \times 10^9$	30
InAs	300	3.2	$1 \times 10^{11}$	1
InAs	195	3.0	$7 \times 10^{11}$	1
InAs	77	5.0	$1 \times 10^{11}$	1
InSb	77	5	$5 \times 10^{10}$	0.1
HgCdTe	200	11.5	$2 \times 10^{10}$	5
HgCdTe	77	4.2	$1 \times 10^{11}$	1
HgCdTe	200	10.6	$2 \times 10^{10}$	0.01
HgCdTe	77	11.5	$2 \times 10^{10}$	0.01
PbSnTe	77	5	$7 \times 10^9$	0.01
GeAu	77	11	$2 \times 10^{10}$	0.01
GeHg	28	25	$3 \times 10^{10}$	0.01
GeCu	5	15	$4 \times 10^{10}$	0.01
SiGa	30	5.6	$3 \times 10^{11}$	0.01
SiIn	50			0.01

Bibliografía:

Allen David A.

"Infrared The New Astronomy".

Keith Reid Ltd Shaldon Devon. Printed  
by Biddles Ltd, Guildford 1975.

American Institute of Physics,

"American Institute of Physics  
Handbook". Third Edition. Mc. Graw-Hill  
U.S.A 1972.

Arons Arnold B.

"Evolución de los Conceptos de la  
Física". Editorial Trillas México 1970.

Blessinger M., Vural K., Kleinhans W., Rieke M.,  
Thompson R. and Rasche R.

"Low Noise HgCdTe 128x128 SWIR FPA for  
Hubble Space Telescope".

Bramson Mickaél ' A.

"Infrared Radiation, A Handbook for  
Applications". Plenum Press New  
York, 1968.

Donald G. Fink, Donald Christiansen.

"Electronics Engineer's Handbook".  
3rd Edition U.S.A. 1989.

Fowler A.M. and Gatley Ian.

"Demonstration of an Algorithm for Read-Noise Reduction in Infrared Arrays". The Astrophysical Journal, 353:L33-L34, 1990 April 10.

Horowitz Paul, Hill Winfield.

"The Art of Electronics".  
Cambridge University press U.S.A. 1988.

Hudson Richard D. Jr. Hudson Jacqueline W.

"The Military Applications of Remote Sensing by Infrared".  
Proceedings of the IEEE, Vol. 63, No. 1.  
1975 IRE(now IEEE). Spie Vol 513.

Infrared Detectors.

Edited by Richard D. Hudson, Jr. and Jaqueline Wordsworth Hudson. Benchmark papers in optics 1975.

John Strong

"Técnicas de Física Experimental".  
Editorial Universitaria de Buenos Aires  
1965.

Kruse, Paul W.; McGlauchlin, Laurence D.;

McQuistan Richmond B.;

"Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission, and Detection". John Wiley & Sons., Inc, New York 1962.

Kozlowski L.J, Vural K., Johnson V.H., Chen J.K.,  
Bailey R.B. and Bui D.

"256x256 PACE-1 PV HgCdTe Focal Plane  
Arrays for Medium and Short Wavelength  
Infrared Applications".  
Rockwell International Science Centre,  
Rockwell Missile System Division.

Landee Davis Albrecht.

"Electronics Designers Handbook".  
2nd Edition Mc-Graw Hill U.S.A 1977.

NICMOS3 Multiplexer User's guide

(revised 8-31-92)

Rockwell International Science Centre,  
Rockwell Missile System.

Preobrazhenski V.P.

" Mediciones Termotécnicas y Aparatos  
para Efectuarlas". Editorial Mir Moscú  
1980.

Readings from Scientific American,

"Atmospheric Phenomena". W.H.Freeman  
& Company, San Francisco U.S.A. 1980.

Richard D. Hudson, Jr.

"Infrared System Engineering". John  
Wiley & Sons, New York USA. 1969.

Roth Fuchs Miguel.

"Detectores Infrarrojos para uso en  
Astronomía". Ciencia(1986) Vol 37,  
número 1 México, marzo de 1986.

Salas Luis.

"Reporte de Temporada de Observación y  
Pruebas de CAMILA".  
Preliminar Instituto de Astronomía  
U.N.A.M. abril 1993.

Roth G.D.

"Astronomy a Handbook". Springer  
Verlag, New York 1975.

Selected papers on Infrared Design

SPIE Vol 513 part One.

SPIE Milestone Series.

Editors Barry Johnson and William L:  
Wolfe. General Editor of Brian J.  
Thompson. The SPIE Milstone Series.

Solomon Musikant,

"Optical Materials, an Introduction to  
Selection and Application". Marcel  
Dekker, Inc. New York 1985.

The Photonics, Design and Applications,  
Handbook Book 3 1989 Laurin  
Publishing Company, Inc USA.

The Scientific Papers of Sir William  
Herschel Vol II.

Published by the Royal Society and the  
Royal Astronomical Society London 1912.

Verschuur Gerrit L.

"The Invisible Universe Revealed, The  
Story of Radio Astronomy". Springer  
Verlag New York 1987.

Wehr Russell, Richards James, Adair Thomas.

"Physics of the Atom".  
Addison Wesley 3rd. Edition  
U.S.A. 1978.

Weigert A., Zimmermann H.

"Concise Encyclopedia of Astronomy".  
Adam Hilger England 1976.