



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DETERMINACION DE LA ABERRACION
GEOMETRICA DE UN DETECTOR
ASTRONOMICO BIDIMENSIONAL

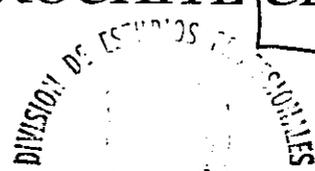
TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

FISICA

PRESENTA

DONAJI XOCHITL CRUZ LOPEZ



DIRECTOR DE TESIS:

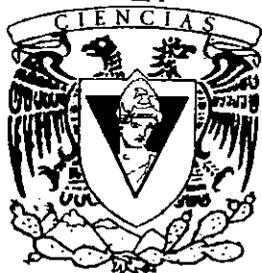
FERNANDO ANGELES URIBE

SECCION POLAR

MEXICO D.F.

2000

281439





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO



MAT. MARGARITA ELVIRA CHÁVEZ CANO
Jefa de la División de Estudios Profesionales
P r e s e n t e

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis:

"Determinación de la aberración geométrica de un detector
astronómico bidimensional"

realizado por CRUZ LÓPEZ DONAJÍ XOCHITL.

Con número de cuenta 9026590-7 , pasante de la carrera de Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

A t e n t a m e n t e

Director de tesis
Propietario Fís. Fernando Ángeles Uribe
Propietario Dra. Martha Rosete Aguilar
Propietario Dr. Salvador Cuevas Cardona
Suplente Dr. Roberto Ortega Martínez
Suplente Fís. Jorge Andrade Herrera

Martha Rosete Aguilar

R. Ortega Martínez

Consejo Departamental de Física
Dra. Patricia Goldstein Menache

AGRADECIMIENTOS

PRINCIPALMENTE DOY LAS GRACIAS A MIS PADRES: MA. TERESA LOPEZ C. Y SERGIO CRUZ C., POR BRINDARME SIEMPRE SU CONFIANZA Y APOYO.

AGRADEZCO AL FIS. FERNANDO ANGELES U. POR SU ASESORIA Y ORIENTACION IMPARTIDOS A LO LARGO DEL PRESENTE TRABAJO, PRINCIPALMENTE POR SER MI MEJOR AMIGO.

GRACIAS A QUIENES FORMAN PARTE DE MI VIDA: MIS HERMANOS: ALAIDE, TONATIUH, RAFAEL Y EVELIA; MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS DEL LEIAUNAM.

Y EN ESPECIAL AGRADEZCO A ANGEL ROMERO DEL VALLE.

INTRODUCCIÓN	4
1. OPTODETECTORES ASTRONÓMICOS	6
1.1 CARACTERIZACIÓN DE UN DETECTOR	6
1.2 FOTODETECTORES DE ESTADO SÓLIDO	7
1.2.1 Fotoconductividad	7
1.2.2 Ruidos presentados por los detectores fotoconductivos	8
1.2.3 Fotoconductores intrínsecos	11
1.2.4 Fotoconductores extrínsecos	13
1.2.5 Fotodetectores de unión	16
1.3 DETECTORES FOTOEMISIVOS	18
1.4 DETECTORES TÉRMICOS	26
2. ABERRACIONES	28
2.1 POLINOMIOS DE ZERNIKE EN ÓPTICA	28
2.2 ABERRACIONES INHERENTES A LA ÓPTICA	31
2.2.1 Aberraciones monocromáticas	31
2.2.2 Aberraciones Cromáticas	36
2.3 ABERRACIONES DEL SISTEMA DETECTOR - HAMAMATSU.	38
2.3.1 Aberraciones ópticas	38
2.3.2 Aberraciones por ruido y linealidad electrónica.	38
2.3.2.1 Aberraciones intrínsecas del detector	38
2.3.2.1.1 Distorsión en el tubo	39
2.3.2.1.2 Degradación	39
2.3.2.2 Aberraciones producidas por los sistemas de adquisición y de enfriamiento	39
3. TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES	40
3.1 TRANSFORMADAS DE LA IMAGEN	40
3.1.1 Transformada de Fourier (T.F.)	41
3.1.1.1 Propiedades de la Transformada de Fourier (T.F.)	42
3.1.2 Transformada Rápida de Fourier (TRF)	46
3.2 TEOREMA DE MUESTREO	46
3.3 MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN	48
3.3.1 Métodos en el dominio espacial	48
3.3.1.1 Transformaciones de intensidades simples:	48
3.3.1.2 Procesamiento de histogramas	49
3.3.1.3 Sustracción de Imágenes	51
3.3.1.4 Promediado de la imagen	51

3.3.1.5	Filtrado espacial	51
4.	SISTEMA DE CONTEO DE FOTONES BIDIMENSIONAL HAMAMATSU	53
4.1	GENERALIDADES	53
4.2	DESCRIPCIÓN DE LA CÁMARA	54
4.2.1	El tubo	54
4.2.2	Electrónica de control	54
4.2.2.1	El analizador de posición.	54
4.2.2.2	Sistema de enfriamiento.	55
4.2.2.2.1	Sistema de control electrónico	56
4.2.2.2.2	Sistema de control mecánico	56
4.2.2.3	Contador de eventos	58
4.2.2.4	Fuente de alto voltaje	58
4.2.3	Señales de salida y control	58
4.2.4	Requerimientos periféricos	59
4.2.5	Cuidados especiales	59
4.3	INTERFASE ELECTRÓNICA (JDR)	59
4.4	INTERFASE ELECTRÓNICA (LEIA)	60
4.5	REQUERIMIENTOS	62
4.6	SISTEMA DE CÓMPUTO	62
5.	DETERMINACIÓN DE LA ABERRACIÓN DE DISTORSIÓN GEOMÉTRICA	68
5.1	MÉTODOS PROPUESTOS	68
5.1.1	Rejilla en el fotocátodo	68
5.1.2	Patrón a Distancia	69
5.2	JUSTIFICACIÓN DEL PRINCIPIO	69
5.3	PATRÓN A INFINITO E INSTRUMENTAL REQUERIDO.	70
5.3.1	Requerimientos instrumentales:	70
5.4	SISTEMA COMPLETO	72
5.5	METODOLOGÍA, ANÁLISIS Y RESULTADOS.	72
5.5.1	Metodología general.	72
5.5.1.1	Componentes que contribuyen a la distorsión geométrica de la imagen adquirida.	73
5.5.2	Distorsión de la lente.	73
5.5.2.1	Metodología para determinar la distorsión de la lente.	73
5.5.2.2	Resultados y análisis de la distorsión de la lente.	74
5.5.3	Distorsión del sistema completo.	74
5.5.3.1	Metodología para determinar la distorsión del sistema completo.	74
5.5.3.1.1	Distancia de enfoque del sistema.	75
5.5.3.1.2	Características específicas para la adquisición y procesamiento de las imágenes.	75
5.5.3.1.3	La imagen ideal	76
5.5.3.2	Correlación cruzada, dirección horizontal	77

5.5.3.3	Distorsión del sistema Hamamatsu, orientación horizontal.	80
5.5.3.4	Correlación cruzada, orientación vertical.	82
5.5.3.5	Distorsión del sistema Hamamatsu, orientación vertical.	85
5.5.4	Distorsión del Detector.	87
5.5.5	Aplicación a una imagen	88
6.	CONCLUSIONES	91
7.	APÉNDICE 1	93
8.	APÉNDICE 2	94
9.	APÉNDICE 3	98
I.	COSUMA	98
II.	CONVERSIÓN DE LA IMAGEN de *.img a *.tif.	100
10.	BIBLIOGRAFÍA	101

Introducción

A lo largo de la historia sobre el estudio del Universo, la Astronomía se ha apoyado en el resultado final de la interrelación entre ciencias y aplicaciones dando origen a la instrumentación astronómica, cuya finalidad principal es poder crear sistemas cada vez más precisos y potentes para la adquisición, almacenamiento y su posterior tratamiento de imágenes estelares.

Entre la diversa gama de dispositivos que han sido creados se encuentran los sistemas de detección que permiten la adquisición de una imagen por intervalos de tiempo y su posterior almacenamiento para así poder efectuar un mejor análisis. Ninguno de estos sistemas de adquisición está excluido de presentar aberraciones en la imagen adquirida que dependerán del principio bajo el cual el sistema fue creado.

El Instituto de Astronomía de la UNAM realiza investigación astronómica de punta por lo tanto, debe estar a la vanguardia sobre sistemas de detección y técnicas de procesamiento de imágenes. Cuenta con su propio departamento de instrumentación en donde se desarrollan proyectos como Óptica Adaptativa aplicando algunos tipos de procesamiento de imágenes. También se utiliza el método de Speckle diferencial empleando un sistema de conteo de fotones bidimensional, la cámara PIAS (Photon Counting Image Acquisition System) de HAMAMATSU. Para aplicar el método de Speckle se requiere de un fuerte control de los efectos de la turbulencia atmosférica que dependen de los tiempos de adquisición y de la aberración de distorsión geométrica del sistema de detección, en nuestro caso el conocer el valor de la distorsión geométrica que presenta la cámara Hamamatsu con intervalo de operación en el visible es fundamental.

El objetivo principal del presente trabajo es presentar y aplicar un método para determinar el valor de la aberración de distorsión geométrica de la cámara Hamamatsu.

Este detector es un préstamo del National Okiyama Observatory de Japón al IAUNAM para aplicarlo en el método de Speckle. Es un sistema cuentafotones bidimensional que consta de un fotocátodo S-20 seguido de un arreglo de placas microcanales y un ánodo resistivo.

Cabe mencionar que para obtener la posición de cada evento y el despliegue de la imagen total se requirió desarrollar la interfase electrónica de lectura y el sistema de adquisición, así como el acondicionamiento de la infraestructura en donde opera el detector. Es importante mencionar que esta tesis es el primer trabajo en el Instituto de Astronomía en proponer y aplicar un método formal para calcular la distorsión geométrica de un detector astronómico abriendo la posibilidad de estudios posteriores sobre este campo en otros detectores.

El presente trabajo se divide en seis capítulos, en el primer capítulo se hace una descripción de los diferentes sistemas de detección empleados en Astronomía. El segundo capítulo presenta los conocimientos básicos sobre aberraciones presentadas en sistemas ópticos debido a que el fotocátodo del detector se basa en un sistema de lentes, así como las aberraciones inherentes del detector. Una vez adquirida la imagen es analizada para conocer la información que nos interesa como la forma de su histograma, la posición de ciertos píxeles, su luminosidad, en nuestro caso la aberración de distorsión geométrica entre otras, para lo cual en el tercer capítulo se explican algunos principios sobre tratamiento de imágenes. El cuarto capítulo describe detalladamente los sistemas que conforman el detector, los requerimientos necesarios para su funcionamiento óptimo, la interfase electrónica de lectura y el sistema de adquisición. El quinto capítulo se detalla la metodología, análisis y resultados obtenidos para conocer el valor de la distorsión geométrica que presenta el detector Hamamatsu. Finalmente se presentan las conclusiones del presente trabajo.

1

OPTODETECTORES ASTRONÓMICOS

Los avances astronómicos dependen de los resultados obtenidos por los sistemas dirigidos a la detección de cuantos de radiación electromagnética, única fuente de información lejana. Con el proceso evolutivo de actuales sistemas optoelectrónicos que explotan los procesos fotoemisivos y fotoconductorivos, la respuesta de este tipo de instrumentos, entre los que se encuentran los detectores, es cada vez mejor. El presente capítulo presenta los diversos detectores optoelectrónicos empleados en Astronomía, sus características principales, sus requerimientos tecnológicos y los problemas que presentan.

1.1 CARACTERIZACIÓN DE UN DETECTOR

Los detectores optoelectrónicos actúan como transductores que reciben fotones y producen una respuesta eléctrica que puede ser amplificada y convertida según sean los requerimientos.

Para poder determinar la respuesta de un detector se requiere conocer el valor de los siguientes parámetros que lo caracterizan.

- A.- Eficiencia Cuántica.*- Fracción de fotones que arriban y es convertida en señal.
- B.- Ruido.*- Incertidumbre en la señal de salida. Idealmente consiste únicamente de fluctuaciones debidas a los fotones que producen la señal.
- C.- Linealidad.*- Proporcionalidad de la señal de salida al número de fotones que fueron recibidos para producir la señal.
- D.- Intervalo Dinámico.*- Máxima variación en señal sobre la cual la salida del detector representa el flujo de fotones sin pérdida significativa de información.
- E.- Número y Tamaño de pixeles.*- Número de elementos de imagen que el detector puede registrar simultáneamente y su tamaño físico sobre el detector.

F.- Tiempo de Respuesta.- Intervalo mínimo de tiempo sobre el cual el detector distingue cambios en la velocidad de arribo del fotón

G.- Respuesta Espectral.- Frecuencias sobre las cuales los fotones pueden ser detectados con eficiencia razonable, es decir, es la variación de la eficiencia cuántica con la longitud de onda.

H.- Ancho de banda espectral.- Tamaño del intervalo de frecuencias temporales sobre el cual los fotones son detectados.

I.- Respuesta (S).- Cociente entre el número de fotones que son convertidos en señal y los que arriban.

J.- Potencia de ruido equivalente (NEP).- Conocida como la mínima señal detectable. Su magnitud es igual al ruido intrínseco del detector.

K.- Detectividad (D).- Capacidad de detección del detector. Su magnitud es el inverso del NEP.

En función de estos parámetros podemos decir que el mejor detector es aquel que presenta una relación de fotones convertidos en señal y fotones que arriban muy cercana a 1 ó 1, es decir, una respuesta $\cong 1$ y un ruido intrínseco casi cero (detectividad $\cong \infty$).

Otra definición importante para poder entender las fórmulas de caracterización de un detector es la *movilidad del electrón* definida como la medida de la viscosidad del cristal a través del movimiento de los portadores de carga.

Los detectores se clasifican de acuerdo al mecanismo de conversión empleado: Fotodetectores de estado sólido, Detectores fotoemisivos y termodetectores.

1.2 FOTODETECTORES DE ESTADO SÓLIDO

Los Fotodetectores son usados para detectar regiones de Rayos X, ultravioleta, visible y regiones espectrales infrarrojas, como ejemplo de estos detectores se encuentran: los Fotoconductores intrínsecos y extrínsecos, los Fotodiodos y los Fotodetectores emisivos. La mayoría de los detectores electrónicos usados en la astronomía Moderna tienen como elemento detector de fotones un fotocátodo semiconductor. Para poder caracterizarlos necesitamos considerar al proceso físico involucrado en la operación de un semiconductor y su interacción con la radiación incidente llamada fotoconductividad.

1.2.1 Fotoconductividad

Generalmente los sólidos pueden ser clasificados como conductores y aislantes, considerando a los semiconductores como una clase especial de aislantes. Su comportamiento eléctrico bajo la influencia de campos eléctricos, radiación electromagnética y calor es representado por *diagramas de bandas de energía*. En los conductores las bandas de valencia y conducción se traslapan por lo que los electrones están disponibles para que fluya una co-

riente, en cambio en aislantes y semiconductores ambas bandas están separadas diferenciándose únicamente por el tamaño de su ancho de energía.

La conducción es posible cuando los electrones son elevados a hileras de niveles de energía más altas e incompletas a través de procesos de excitación que pueden ser aplicando una energía electromagnética ó térmica, por ello, a temperatura de cero absoluto su conductividad eléctrica debe ser cero. Cuando los electrones son elevados a la banda de conducción en un semiconductor o aislante, crean posiciones vacías en el estado de valencia llamados *huecos*, los cuales están cargados positivamente por un ión en el material.

Los optodetectores semiconductores tienen como principio básico el proceso de excitación de los electrones de la banda de conducción, alterando dramáticamente sus propiedades eléctricas al absorber un fotón ultravioleta, visible o infrarrojo, considerando el efecto térmico como la fuente de mayor ruido.

Si a algunos semiconductores se les agregan pequeñas impurezas, sus propiedades eléctricas se pueden modificar ampliando su temperatura de operación, a este tipo de semiconductores se les denomina *extrínsecos*, si no contienen impurezas son *intrínsecos*. Existen dos tipos principales de impurezas: las *impurezas donantes o donadoras* se encuentran en un elemento cuya capa de valencia contiene un excedente de electrones que son desprendidos fácilmente para convertirse en electrones de conducción, el material en el que se encuentran es llamado de tipo *n* (Fig. 1a). Para las *impurezas aceptoras* su capa de valencia no tiene todos los electrones para formar los enlaces requeridos, entonces, sus átomos tienden a capturarlos o aceptarlos desde los átomos semiconductores creando huecos en la banda de valencia del semiconductor y decreciendo su conductividad, el material en el cual dominan los huecos es llamado tipo *p* ó aceptor. (Fig. 1b)

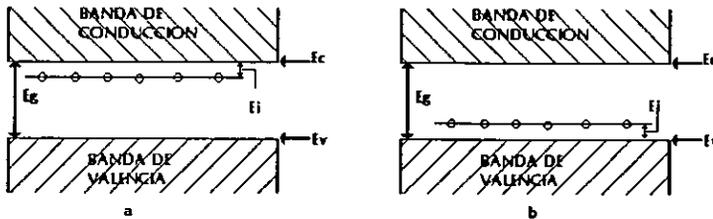


Fig. 1 a) Impureza donadora [1]. b) Impureza aceptoras E_v [1].

1.2.2 Ruidos presentados por los detectores fotoconductivos

El funcionamiento de todos los detectores está limitado por el ruido estocástico asociado al proceso, normalmente especificado en términos de la raíz cuadrada promedio del voltaje ó de la corriente, usualmente se presentan diversas fuentes de ruido en un sistema y su efecto neto será la suma de sus raíces promedio. Los ruidos se clasifican en:

- **Potencia de ruido equivalente (NEP).**- Definimos la sensibilidad a través de la respuesta efectiva sin que esto nos dé la radiación de flujo mínimo que puede ser detectado. El flujo mínimo detectado se define como la potencia de radiación incidente requerida para producir una señal de voltaje de salida V_o igual al nivel de ruido del voltaje V_n del detector, es decir una razón de señal a ruido de unidad.

$$NEP = \frac{V_n}{S} \quad [W] \quad y \quad S = \frac{V_o}{IA} \quad [V/W]$$

Todos los valores son cuadráticos medios.

I = Irradianza [W/m²].

A = Área sensible [m²].

- **Irradiancia equivalente de ruido (NEI ó NEFD).**- Densidad de flujo radiante requerido para producir una señal de salida igual al ruido del detector

$$NEI = \frac{NEP}{A} = \frac{IV_n}{V_o} \quad [W/m^2]$$

- **Ruido de Johnson.**- Este tipo de ruido fue caracterizado por Johnson en 1928, se observa en todos los materiales resistivos y ocurre en la ausencia de cualquier portador eléctrica, se determina a través de su corriente y voltaje [3]:

$$i_j = \left(\frac{4kT\Delta f}{R} \right)^{1/2} \quad y \quad V_j = (4kTR\Delta f)^{1/2}$$

T = Temperatura en operación.

k = Constante de Boltzmann.

R = Resistencia.

Δf = Intervalo de frecuencias de respuesta.

Por ser este tipo de ruido independiente de una frecuencia específica se le conoce como ruido blanco, sólo depende de la temperatura.

- **Ruido Generación - Recombinación (G-R).**- Se produce por las fluctuaciones en la velocidad de generación y recombinación óptica y térmica de los portadores libres, ocasionando una variación en su concentración promedio. El espectro para una fuente de ruido G-R es plano hasta un valor aproximadamente igual al inverso de la vida media de un portador libre, decae a aproximadamente 6 dB por octava. Las expresiones la corriente y el voltaje del ruido G-R fueron derivadas por Long y Kruse [3], para el caso de un detector intrínseco están dadas por:

$$i_n = 2qG(\varphi\eta\Delta f)^{1/2} \quad \text{y} \quad V_{G-R} = 2qGR(\varphi\eta\Delta f)^{1/2}$$

q = Carga eléctrica de los portadores de carga.

G = Ganancia fotoconductiva.

φ = Fotones por segundo que arriban.

η = Eficiencia cuántica.

- *Ruido de Golpe.* - Lo presentan sistemas de unión. Se incrementa debido al movimiento térmico azaroso, provoca variaciones en las velocidades de difusión en la zona neutral de la unión ocasionando fluctuaciones de generación-recombinación en esta zona y en la de rarefacción¹. Sus expresiones matemáticas reales no han sido derivadas, pero Buckingham y Faulkner [3] las derivaron para el caso ideal en un diodo:

$$I_s = [(2qI + 4I_0)\Delta f]^{1/2} \quad \text{con} \quad I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad \text{y} \quad R_0 = \frac{kT}{qI_0}$$

R_0 = Resistencia a sesgo cero.

También lo exhiben los tubos de vacío y fotoemisivos, causado por variaciones en la velocidad de arribo de los electrones al electrodo colector. Para la corriente, está expresada por:

$$i_n = [(2qI_0)\Delta f]^{1/2}$$

I_0 = Corriente oscura desde el fotocátodo, se incrementa desde la emisión termoiónica, su espectro de potencia será plano.

- *Ruido 1/f.* - Lo presentan tanto semiconductores como fototubos. En sistemas semiconductores es asociado a efectos de la barrera de potencial al contacto, trampas en la superficie y superficie de fugas de corrientes, para reducirlo en el funcionamiento del detector se requiere un sistema de fabricación cuidadoso y para el caso de fotodiodos se opera el detector a sesgo cero. Debido a que su espectro de potencia se aproxima a una dependencia inversa de la frecuencia [3], su expresión aproximada es:

$$i_n = \left(\frac{kI_B^\alpha \Delta f}{f^\beta} \right)^{1/2}$$

en la mayoría de los casos α se aproxima a 2 y β está entre 0.8 - 1.5.

¹ *Región de Rarefacción.* - Región de un semiconductor que contiene los iones aceptores y donantes cuyos huecos o electrones supernumerosarios han sido suprimidos.

Los detectores fotoconductorivos pueden ser divididos en tres categorías: Intrínsecos, Extrínsecos y Sistemas de portadores libres.

1.2.3 Fotoconductores intrínsecos

Es considerado el tipo más básico de detector optoelectrónico, su proceso físico es la absorción de un fotón suficientemente energético por el material semiconductor intrínseco tal que, uno de los enlaces covalentes es roto y se crea un par electrón-hueco provocando una disminución temporal de la conductividad real. En un fotoconductor práctico los fotones únicamente inciden en una superficie del cristal. (Fig. 2)

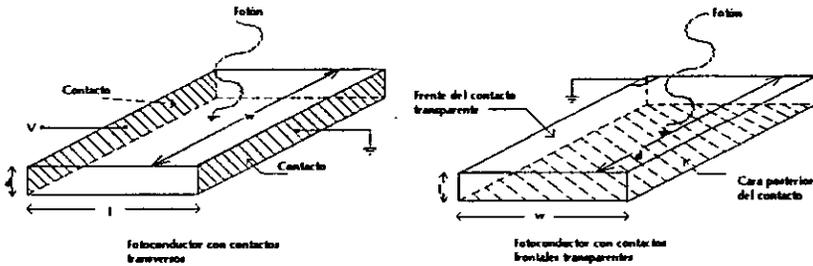


Fig. 2 Fotoconductor intrínseco [1].

Para caracterizar, sus propiedades son definidas con respecto al contacto eléctrico y no a la dirección del fotón que arriba, obteniendo las siguientes relaciones:

- *Movilidad del electrón* (μ_n): $\mu_n = -\frac{\langle v_x \rangle}{E_x}$ [$\text{cm}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$]

$\langle v_x \rangle$ = Velocidad efectiva de la carga eléctrica.

E_x = Campo eléctrico aplicado.

- *Conductividad* (σ): Los portadores de carga son generados por excitación térmica y por la absorción de fotones. Suponiendo que el detector opera a la temperatura adecuada, despreciamos la conductividad inducida térmicamente.

$$\sigma_{ph} = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad [(\Omega\text{cm})^{-1}] \quad \text{con} \quad n = \frac{\phi\eta\tau}{wdl}$$

μ_n = Movilidad del electrón.

μ_p = Movilidad de los huecos.

$n = p$ = Concentración de los portadores de carga.

w = Ancho del detector.

l = Longitud del detector.

d = Profundidad del detector.

ϕ = Fotones por segundo que arriban.

η = Eficiencia cuántica.

τ = vida media de los portadores de carga antes de la recombinación.

- Resistencia al paso de la corriente (R_d): $R_d = \frac{l}{\sigma w d} \quad [\Omega]$

σ = Conductividad.

- Respuesta (S): $S = \frac{\eta \lambda q G}{hc} \quad [A/W]$ con $G = \frac{\tau \mu E_x}{l}$

G = Ganancia fotoconducativa.

- Eficiencia cuántica (η): Para un fotoconductor ideal es independiente de la longitud de onda hasta alcanzar el valor de λ_c , la longitud de onda correspondiente a la energía de ancho de banda. Realmente cerca de esta longitud de onda la excitación térmica afecta la producción de electrones de conducción por fotones absorbidos. Si ignoramos la reflexión desde las caras del detector y los fotones atraviesan una distancia z [cm] en el material tenemos:

$$\eta = 1 - e^{-\alpha z} \quad \text{y} \quad \lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} \quad [\mu\text{m}/\text{eV}]$$

λ_c = Longitud de onda de corte.

- Frecuencia de Respuesta (f_R): Su expresión se obtiene al analizar al fotodetector como un simple capacitor de placas paralelas relleno con un dieléctrico. Una gran variedad de factores la limitan, entre ellos se encuentran la relajación dieléctrica y la constante de tiempo. La relajación dieléctrica le ocasiona una reducción inversamente proporcional al número de fotones incidentes, por ejemplo, a bajos niveles de luz produce un decremento importante. Usualmente tiene un intervalo de cero hasta megahertz. Para optimizarlo se maximiza su respuesta (S). Para un fotoconductor es:

$$f_R = \frac{V_0}{\left[1 + (2\pi f \tau_{RC})^2\right]^{1/2}} \quad [\text{Hz}]$$

f_R = Frecuencia de respuesta.

f = Frecuencia de corte.

τ_{RC} = Tiempo de relajación dieléctrica.

Los fotoconductores intrínsecos presentan una respuesta espectral limitada a los fotones que tienen energías iguales o por arriba del ancho de banda de la energía del material detector, entre los que tienen las mayores anchos de banda de energía están los semiconductores de Silicio y Germanio con energías correspondientes a longitudes de onda máximas de 1.1 μm y 1.8 μm respectivamente, sin embargo, la gran mayoría de los otros compuestos semiconductores tienen anchos de banda menores por lo que son usados como fotoconductores intrínsecos con un tiempo de respuesta muy rápido. Son incapaces de funcionar a muy bajos niveles de luz, presentan un ruido de Johnson alto y lo más importante su comportamiento decae fuertemente a longitudes mayores de los 15 μm debido a la pobre estabilidad de los materiales por lo que la detección dentro del intervalo infrarrojo debe de ser basada en otro tipo de mecanismo.

1.2.4 Fotoconductores extrínsecos

Emplean el mismo proceso físico que los fotoconductores intrínsecos, su única diferencia es que el fotón es absorbido por un material semiconductor extrínseco. La energía de excitación E_i debe ser sustituida por la energía necesaria para atravesar el ancho de la banda E_g , este proceso requiere incrementos de energía menores a la de los fotoconductores intrínsecos facilitando la respuesta a grandes longitudes de onda como la infrarroja. Son constituidos generalmente de silicio, germanio, arsénico, empleando diversas técnicas. En arreglos de dos dimensiones contienen cientos de pixeles y pueden proporcionar un excelente funcionamiento a longitudes de onda mayores a los 200 μm con niveles de luz y temperatura extremadamente bajos.

La *vida media de un portador semiconductor extrínseco* es rigurosamente proporcional al inverso de la concentración de la mayoría de impurezas ionizadas con las cuales los portadores libres se recombinan, por lo tanto la minoría neutral y la mayoría de átomos impuros se ionizan unos a otros por un intercambio de cargas portadoras, es decir, los átomos de *tipo n* contribuyen con sus electrones sobreenergizados a los huecos en los átomos *tipo p*, siendo el tiempo de recombinación proporcional al inverso de la concentración de la minoría de impurezas.

Todos los detectores de estado sólido son muy sensibles a partículas energéticas que producen un alto número de portadores de carga libres al pasar a través del volumen sensi-

ble del detector, por lo que, este tipo de detectores deben tener un gran volumen para activar eficiencias cuánticas razonables. En consecuencia, en un ambiente con alta radiación son frecuentemente bombardeados y generan una alta razón de señales espúreas, desafortunadamente operan a bajos niveles de ruido de fondo y las partículas de alta energía crean un daño permanente en los enlaces del cristal. Los defectos en la estructura pueden actuar como impurezas debido a que generan niveles adicionales de energía que funcionan como aceptores o donantes, en consecuencia, incrementan el tiempo de recombinación y por lo tanto su respuesta, provocando así conducta no estable y un incremento más rápido del ruido que de la respuesta degradando cualquier medida efectuada con este detector.

Presentan diversos tipos de ruido, entre los más importantes se encuentran:

- *Respuesta de gancho.*- Es asociada al efecto de tunelaje mecánico-cuántico de los portadores de carga desde la barrera de voltaje al contacto.
- *Picos espontáneos.*- Se producen cuando las cargas son aceleradas en campos eléctricos cercanos a los contactos y adquieren la energía suficiente para impactar e ionizar impurezas en el material creando una miniavalancha de portadores de carga.
- *Excitación térmica.*- Es producida por la presencia de impurezas con pequeños valores de E_i que hacen excitar la conductividad significativamente creando conductividad térmica no deseada. Para contrarrestar este problema se agrega el tipo opuesto de impurezas de manera controlada, por ejemplo: si la impureza es de *tipo n* se le agrega *tipo p* sin embargo, este método es crítico debido a que el material empleado para compensar es inferior en cuanto a las características de pureza que requiere teóricamente un buen detector, provocando que si se emplea una alta concentración de impurezas se obtenga la rápida captura de portadores de carga fotoexcitados y en consecuencia se reduzca la ganancia fotoconductiva de manera aleatoria impidiendo así su control.

Tanto la respuesta de gancho como los picos pueden ser minimizados por el tipo de construcción de los contactos eléctricos del detector ó el tener una ganancia fotoconductiva baja.

Para mejorar este tipo de detectores se han aplicado algunas variantes a su funcionamiento principal creando los detectores forzados, los de bandas de impurezas bloqueadas (BIB) y el fotomultiplicador de estado sólido.

El funcionamiento de los *detectores forzados* consiste en aplicar un esfuerzo sobre los enlaces interatómicos del cristal provocando, un requerimiento menor de energía para romper los enlaces y así extender el intervalo de respuesta del fotoconductor. Requieren aplicar, mantener y controlar una presión uniforme. Muestran una respuesta dependiente de la longitud de onda hasta alcanzar la longitud de onda de corte. En los fotoconductores de *Ge:Ga* alcanzan longitudes de onda de 115 μm en operación normal, al ser forzados alcanzan hasta 200 μm [1].

El tener un nivel de impurezas en un fotoconductor extrínseco ocasiona requerimientos contradictorios cuando lo que se desea es tener conductividad eléctrica baja y absorción eficiente de fotones infrarrojos, para evitarlos se crea el *detector tipo BIB* bajo la filosofía

- Para una operación correcta se debe localizar un sesgo positivo sobre la capa activa y así provocar que los electrones en la banda de impurezas, bajo una mínima excitación térmica, pueden saltar hacia la capa de bloqueo siendo detenido a menos que su energía sea suficiente para elevarse hacia la banda de conducción. Cuando se absorbe un fotón en la capa activa-infrarroja éste eleva un electrón desde la banda de impurezas hacia la banda de conducción donde es detenido por la capa bloqueadora sin embargo, las bandas de conducción de las capas activa y de bloqueo son continuas, por lo que el electrón puede pasar sin impedimento hacia el contacto, al mismo tiempo los huecos producidos por la absorción de un fotón emigran al contacto opuesto y son recolectados.

El *fotomultiplicador de estado sólido* fue creado para evitar la dispersión en la ganancia producida por la separación de la región activa-infrarroja de un detector BIB, dando origen a detectores con una región de ganancia distinta y optimizada. Es muy similar a un *BIB Si:As* en su estructura interna exceptuando que se coloca una región de ganancia bien definida con una concentración aceptora entre $0.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ y $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, comúnmente la región de absorción infrarroja tiene una concentración aceptora más baja, su espesor de alrededor de $4 \mu\text{m}$. También es similar en el fuerte campo eléctrico que se desarrolla cuando la región presenta una concentración aceptora cada vez menor al estar el detector sesgado apropiadamente y en su respuesta espectral. Sin embargo, un solo fotón detectado produce un pulso de salida que contiene aproximadamente 40 000 electrones, lo cual es fácilmente distinguible del ruido eléctrico, estos pulsos tienen anchos intrínsecos de pocos nanosegundos aunque son amplificados por la electrónica de salida en tiempos de $1 \mu\text{s}$ aproximadamente, la velocidad del pulso obscuro más bajo puede ser obtenida al reducir las temperaturas de operación a expensas de reducir la eficiencia cuántica.

1.2.5 Fotodetectores de unión

El fotodetector de unión o fotovoltaico consiste de dos regiones de material con una barrera de potencial interna que produce una capa de agotamiento obteniendo una corriente con mejores propiedades que cualquier otro detector. Los fotones son absorbidos por el material creando pares electrones-huecos y una minoría de portadores difusos en la unión que se dirigen a la región de carga donde sesgan la unión para producir ya sea un voltaje de circuito abierto o una corriente de cortocircuito, consecuentemente la curva corriente-voltaje característica de cada sistema no es muy lineal pero muestra mejores propiedades, como es el caso de los fotoconductores. (*Fig. 4*)

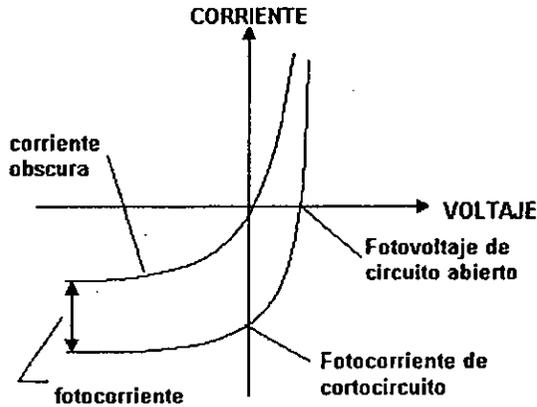


Fig. 4 Curva corriente -voltaje característica de un detector fotovoltaico [3].

Para obtener una alta eficiencia cuántica, toda la radiación incidente debe ser absorbida dentro de la región de difusión de la unión, por lo que esta superficie tiene un alto coeficiente de absorción. La profundidad de la unión debe ser pequeña comparada con su extensión, la cual presenta una velocidad de recombinación baja. Si no hay radiación incidente se presenta corriente oscura. Un detector de unión normal es fabricado con una región tipo *p* y una tipo *n* formadas en el mismo material las cuales son conocidas como *homouniones*² *p-n*. Efectos similares al de una unión *p-n* son producidos por una interfase metal-semiconductor conocida como Barrera de Schottky en donde, generalmente una capa delgada de metal es depositada dentro del material semiconductor, si el sistema es semitransparente puede ser iluminado por ahí. Alternativamente los detectores son iluminados por detrás a través de un apropiado semiconductor delgado. Estos sistemas son más aplicables para semiconductores en los cuales ambos materiales tipo *n* y *p* no pueden ser fácilmente preparados para sistemas de homounión. La mayoría de estos sistemas emplean absorción intrínseca sin embargo es posible producir un efecto fotovoltaico extrínseco.

Las estructuras fotovoltaicas descritas anteriormente no tienen amplificación interna, siendo posible obtener ganancias grandes con un fotodiodo de avalancha.

En un Fotodiodo de avalancha los portadores de carga pueden ser acelerados lo suficiente en la región de difusión de tal manera que producen portadores de carga adicionales por el proceso de avalancha. Deben tener un campo suficientemente grande para excitar portadores de carga a través del ancho de banda. El efecto de avalancha es sobre huecos y electrones. Como consecuencia presenta un incremento en ruido, que no es importante si la amplificación de la corriente es útil. (Fig. 5)

² Es posible producir una estructura heterounión de dos semiconductores distintos, presentan un mismo espaciado en la estructura y enrejado. Dos de las más importantes estructuras de heterounión son GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs y PbTe-Pb_{1-x}Sn_xTe.

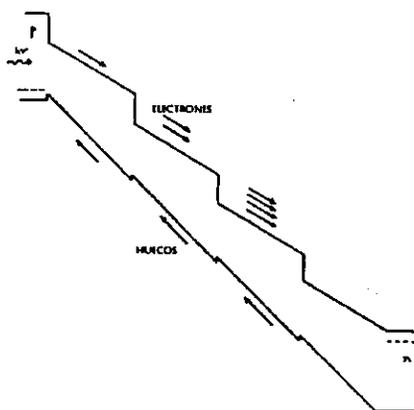


Fig. 5 Diagrama de la banda de una estructura multicapas bajo sesgo, mostrando la ganancia producida por los electrones en la banda de conducción [3].

Estos detectores ofrecen un mejor tratamiento de ruido, operan a bajos voltajes con sensibilidad en regiones espectrales cercanas al infrarrojo, presentan una simplificación considerable a la electrónica asociada, reducen el calor producido para sistemas fríos, se pueden acoplar a otros sistemas sin requerir una interfase de amplificación, son fabricados como estructuras planas para grandes usos en arreglos bidimensionales, se consideran como la versión de estado sólido de los tubos fotomultiplicadores. En teoría su detectividad máxima es de aproximadamente el 40% mayor que la de un fotoconductor debida a la ausencia de ruido G-R. Este tipo de detector es útil cuando se requiere una frecuencia de respuesta alta y un tiempo de respuesta bajo. Donde existen bajos niveles de iluminación su rápida respuesta tiene que ver con el arribo de un único fotón. Son empleados cuando se requiere un detector rápido, robusto, compacto y económico. El campo aplicado es 20 veces mayor que el de un detector BIB. Para un sistema de cinco estados con un espesor de 3000 Å en cada capa se obtiene una ganancia aproximada de 32 veces mayor que para un fotoconductor normal, con un voltaje de operación de 5 V.

1.3 DETECTORES FOTOEMISIVOS

El principio de fotoemisión fue descubierto en 1887 por Hertz [3] cuando observa que una partícula cargada negativamente era emitida desde un conductor al ser irradiado con ultravioleta, estudios posteriores demuestran que al emplear un electrodo de metal alcalino este efecto puede ser producido con radiación visible. La explicación satisfactoria fue dada en 1905 por A. Einstein al proponer su teoría de fotoemisión, explicándolo en términos de la emisión de electrones inducida por radiación incidente. Se estudiaron diversos tipos de materiales, sus respuestas espectrales, el alcance de sus longitudes de onda pero su uso práctico fue limitado por eficiencias cuánticas muy bajas, menores a 10^{-4} electrones/fotón incidente. En 1921 el descubrimiento del fotocátodo plata-oxígeno-cesio (Ag-O-Cs) por Koller

y Campbell [3] cambia el panorama debido a que el material tiene una eficiencia cuántica de dos órdenes de magnitud mayor, su estudio y desarrollo fue puramente empírico y dirigido a producir materiales con mayor sensibilidad dentro de regiones cercanas al infrarrojo. Es hasta el estudio de materiales semiconductores y paralelamente a los progresos en física de estado sólido que llega a ser comprendido totalmente, incrementándose sus aplicaciones al crear sistemas tales como el fotomultiplicador y el iconoscopio.

Los detectores fotoemisivos usan campos eléctricos, magnéticos o ambos para acelerar la eyección del electrón hacia un amplificador, habilitándolo para ser detectado como una corriente o como una partícula individual. Presentan un tiempo de resolución muy alto a niveles de áreas sensibles de algunos centímetros de diámetro, una excelente resolución espacial uno a uno con lectores electrónicos de salida o por versiones de despliegue amplificados del patrón de luz de entrada sobre pantallas de salida, eficiencia cuántica moderada particularmente a longitudes de onda visible y ultravioleta, son inigualables en sensibilidad a temperatura ambiente o con poco frío, si la velocidad de arribo del fotón es bastante baja pueden distinguir a cada uno y son extremadamente lineales.

El sistema funciona por la acción de un potencial negativo sobre su cátodo³ y ánodo⁴. Al arribar el fotón libera un electrón desde el fotocátodo, el cual es acelerado por un campo eléctrico. El potencial negativo del fotocátodo ayuda a acelerar a los electrones emitidos en dirección al interior del vacío y, el campo eléctrico producido guía al electrón hacia el ánodo donde es recolectado produciendo una señal. De la calidad del vacío entre cátodo y ánodo depende el decaimiento de los portadores de carga libre.

La *eficiencia del fotocátodo* es determinada por tres mecanismos: eficiencia de absorción para fotones, pérdida de electrones al ser transportados desde los sitios de absorción a la superficie del fotocátodo y pérdida de energía en la superficie de la barrera debida a la inhibición de electrones emitidos desde el fotocátodo. Al maximizar la eficiencia del cátodo se obtiene un buen funcionamiento de estos detectores.

Entre los diferentes fotocátodos convencionales están los fotocátodos de metal que han sido sustituidos por los fotocátodos semiconductores. En el caso de un metal la reflectividad de un fotón es alta en las regiones del espectro visible y cercanas al infrarrojo y la pérdida de energía de cualquier portador excitado será rápida, por lo tanto, la eficiencia cuántica y el potencial de ionización serán menores a mayores longitudes de onda de operación siendo la difracción del electrón el proceso dominante. Su función de trabajo, ϕ , está definida como la diferencia de energía entre el nivel de Fermi y la mínima energía libre de un electrón dentro del vacío, $E_{vac}=0$.

En el caso de un semiconductor los dos métodos por los cuales un fotoelectrón perderá energía son: impacto de ionización⁵ y difracción de estructura⁶. Su nivel de Fermi será

³ *Cátodo.*-Terminal más negativa, análogo a la región tipo p del diodo.

⁴ *Ánodo.*- Terminal más positiva, análogo a la región tipo n del diodo.

⁵ *Impacto de ionización.*- Producción de un par electrón-hueco.

⁶ *Difracción de estructura.*- Producción de un fonón.

modificado definiéndose el parámetro *afinidad del electrón* E_A como la diferencia en energía entre la banda de conducción más baja y el nivel vacío (E_G), la cual será una constante del material e independiente de la impureza contenida. Consecuentemente podemos decir que la energía mínima requerida por un fotón para producir fotoemisión será $(E_G + E_A)$ a menos que la densidad de electrones en la banda de conducción fuese suficientemente alta para permitir la absorción de un fotón, pero este caso es raro. Si $(E_G + E_A)$ es menor que 3eV la emisión será en la región del visible del espectro, sin embargo, este intervalo se puede ampliar con las propiedades de los semiconductores hasta cercanas al infrarrojo obteniendo una alta eficiencia cuántica y grandes intervalos de longitudes de onda a través de este método. Con E_{Th} la energía umbral. (Fig.6)

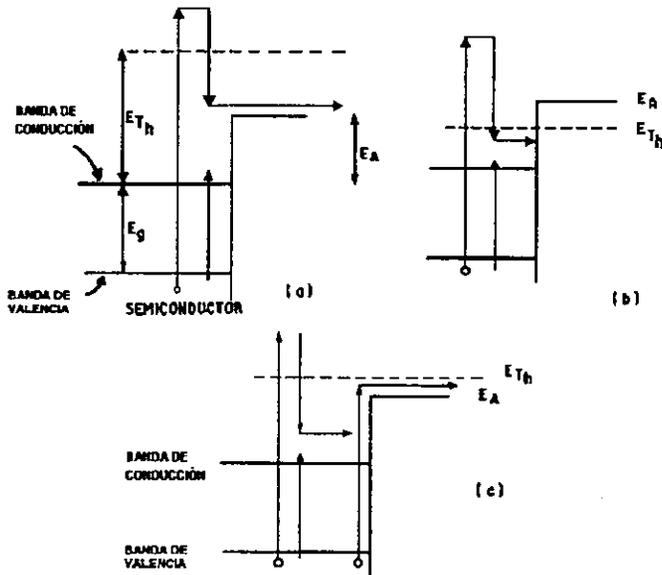


Fig. 6 Diferentes condiciones consideradas para el proceso de fotoemisión

de un fotocátodo convencional [3].

Para bajos niveles de luz la detección es interferida por la corriente oscura producida por la dispersión del electrón, esta corriente es dominada usualmente por la emisión de electrones excitados térmicamente empleándose dos procedimientos para su control:

- Enfriar el detector. Normalmente a temperaturas de -80 a -20 °C se reduce la componente térmica, la temperatura requerida depende del material fotoemisivo.
- Restringir el área del detector. A través de la aplicación de campos magnéticos externos sobre toda el área para desviar fotoelectrones o, creando una pequeña área de la superficie fotoemisiva lejos del recolector y del aparato de amplificación, este método es

aplicable únicamente a sistemas que no desplieguen el patrón de luz sobre pantallas de salida.

Se puede mejorar su respuesta a través de su fabricación, al establecer y mantener una alta calidad de vacío dentro del sistema, diseñar el sistema con alta resistencia eléctrica entre la entrada y la salida, y mantener un alto nivel de limpieza para que la alta resistencia no esté comprometida por la contaminación. Un método para ampliar su longitud de onda de operación es generar un mayor campo de emisión de fotoelectrones por el campo magnético extremo aplicado para así ayudar en la emisión de fotoelectrones desde la superficie del material sin embargo, por este método se obtienen muy bajas eficiencias.

La tabla 1 [3] presenta los fotocátodos semiconductores más importantes:

TABLA 1			
NÚMERO DE RESPUESTA ESPECTRAL	MATERIAL FOTOEMISIVO	MATERIAL DE LA VENTANA	LONGITUD DE ONDA DE MÁXIMA RESPUESTA (Å)
S-1	Ag-O-Cs	Silice fundida	8,000
S-4	Cs ₃ Sb	Silice fundida	4,000
S-5	Cs ₃ Sb	Vidrio transmisor UV	3,400
S-6	Na	No especificado	
S-9	Cs ₃ Sb Semitransparente	Silice fundida	4,800
S-10	Bi-Ag-O-Cs Semitransparente	Silice fundida	4,500
S-11	Cs ₃ Sb Semitransparente	Silice fundida	4,400
S-12	CdS	Silice fundida	
S-13	Cs ₃ Sb	Cuarzo fundido	4,400
S-19	Cs ₃ Sb	Cuarzo fundido	4,440
S-20	Sb-K-Na(Cs) Semitransparente	Silice fundida	4,200
S-21	Cs ₃ Sb	Vidrio transmisor UV	4,200
S-24	Na ₂ KSb	Silice fundida	4,200

Debido al interés propio, describiré los fotocátodos de antimonio multialcalinos Cs₃Sb, de los cuales se han producido una gran variedad:

- El NaKSb tiene un pico de sensibilidad en la región azul y sin embargo, su rendimiento cuántico es un poco más bajo que otros antimonios multialcalinos. Puede ser usado a temperaturas más altas de 150 °C y si se introduce una pequeña porción de Cesio su respuesta puede ser extendida cerca de la región infrarroja.
- El S-20 tiene una ventana de vidrio, se le han reportado sensibilidades más allá de 500 μA/lm con corrientes oscuras de 10⁻¹⁵ Amp.cm⁻².
- El cátodo oxidizado K₂CsSb empleado para aplicaciones de longitudes de onda más corta tiene picos en la región azul y es usado para detectar radiación nuclear en un contador centelleante.

- El Cs_3Sb es empleado para propósitos generales, también se emplea el Ag-O-Cs si la respuesta que se requiere es cercana al infrarrojo. Generalmente tienen altas eficiencias cuánticas pero son difíciles de preparar por lo que su uso ha sido generalmente limitado a una mayor especialización del fotomultiplicador y a los tubos intensificadores de imagen.

Para mejorar el proceso de fotoemisión y extender la sensibilidad de la longitud de onda debe ser reducida la afinidad del electrón ó idealmente debería ser negativa por lo que se crearon los *sistemas de electrón con afinidad negativa, NEA*, tomando consideraciones en la banda de estructura de materiales semiconductores. En 1965 Scheer y Van Laar [3] lo-gran producir un electrón con afinidad negativa activándolo con arseniuro de galio con un alto porcentaje de envenenamiento tipo p y revestido con una capa de cesio. Este produce un fotocátodo con rendimiento cuántico arriba de la longitud de onda de corte del material. Con estos resultados concluyeron que la emisión era independiente de las propiedades de la fuente y por consiguiente que el nivel de vacío del semiconductor debería ser más bajo que el de un electrón libre en la banda de conducción del cristal, de tal manera, que cualquier electrón excitado en el bulbo será emitido libremente, por lo que esto es un sistema de emisión de electrón frío comparado al proceso del electrón caliente requerido para un fotoemis-sor clásico. (Fig. 7)

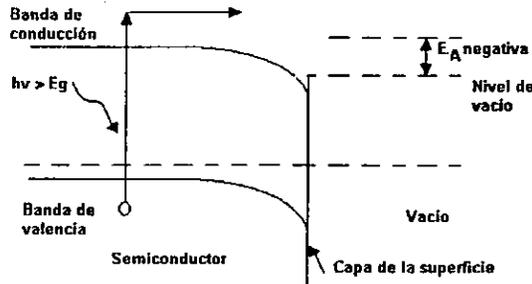


Fig. 7 Proceso de fotoemisión y estructura de la banda de energía para un fotocátodo tipo p de electrón con afinidad negativa [3].

Estos sistemas son fabricados de cristales degenerados por envenenamiento de tipo p, su energía umbral es determinada por la energía del ancho de banda, la cual debe ser menor a 1.2 eV equivalente a una longitud de onda de corte de 1 μm , sin embargo la eficiencia cuántica completa será reducida para cortas longitudes de ondas. De acuerdo al tipo de aleaciones empleadas sus anchos de banda pueden ser variados al ajustar su composición.

Las *ventajas* de estos sistemas fotoemisivos al compararlos con otros fotodetectores son: Mayor rapidez, alta ganancia y bajo ruido interno de amplificación que puede ser incorporado dentro del detector por uso de un multiplicador de electrones y emisión secunda-

ria. Se pueden fabricar detectores de áreas grandes seguidos de sistemas de visualización de imagen, para alta resolución espacial los tubos de imágenes pueden ser integrados con un rayo visualizador de electrones de lectura-salida (scanned electron beam read-out) siendo su mayor problema la limitada respuesta en la región infrarroja, el factor limitante es tener el material adecuado de la ventana.

Entre algunas de las aplicaciones para los cuales estos sistemas son ampliamente usados están: la detección de señales de intensidades muy bajas, pulsos de radiación de altas velocidades y muy alta resolución espacial tales como las imágenes.

El *fotomultiplicador* es uno de los usos más comunes del detector fotoemisivo, en él los fotoelectrones emitidos por el cátodo son acelerados por un campo eléctrico hacia la primera capa del multiplicador de electrones conocido como el primer dínodo. El multiplicador de electrones consiste de una serie de dínodos, los cuales son polarizados convenientemente para que los electrones emitidos sean acelerados en cada uno de manera sucesiva, finalmente los electrones son capturados por el ánodo. La ganancia del electrón en el canal va a depender del voltaje aplicado, la razón de la longitud del canal al diámetro y las características de emisión secundarias de la superficie del canal, como la ganancia es determinada por la razón de la longitud del canal al diámetro las dimensiones pueden ser disminuidas sin afectar al sistema, grandes cantidades de estos multiplicadores pueden ser agrupados para formar una placa microcanal (MCP).

Para este sistema el fotocátodo generalmente es un material fotoemisivo semitransparente depositado en la superficie interior de la cara terminal del tubo, esto permite acoplar directamente la fuente y el detector, reduciendo una pérdida de luz de operación con baja emisión termoiónica para reducir las contribuciones de la corriente oscura. El límite de la longitud de onda más corta es usualmente determinada por el material de la ventana del fototubo.

Para determinar el material con el que son fabricados los dínodos se estudia el alcance de emisión secundaria⁷, su estabilidad, la magnitud mínima de la corriente oscura y el ruido residual del cátodo. Generalmente buenos fotoemisores son buenos emisores de electrones secundarios por lo que los materiales más populares seleccionados para dínodos son: antimonio de cesio, el cual ofrece una alta ganancia a bajos voltajes pero presenta una pobre estabilidad térmica, y la aleación magnesio-óxido de plata, opera a altas corrientes y temperaturas, sin embargo requiere un incremento en el voltaje aplicado.

El canal multiplicador consiste de un tubo de vidrio hueco de típicamente de 1 mm de diámetro revestido con una capa resistiva con alto coeficiente de emisión secundaria. (Fig. 8)

⁷ Emisión secundaria.-Segunda emisión de electrones producida por el impacto de un electrón producto de una emisión anterior.

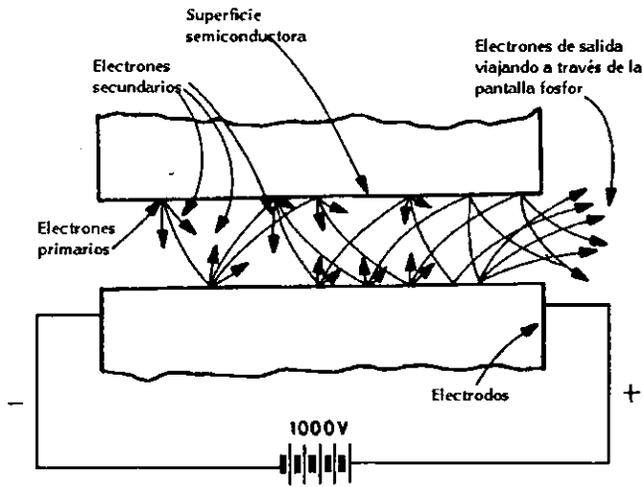


Fig. 8 Placa microcanal, Operación de un canal multiplicador de electrones [3].

El ruido de golpe o ruido Shot y el ruido de Johnson son sus ruidos principales, el ruido Shot es debido a fluctuaciones en la velocidad de llegada de los electrones al ánodo siendo su expresión $(\overline{\delta V^2})^{1/2} = GR(2ei\Delta f)^{1/2}$, con una amplificación interna G del tubo, y el ruido de Johnson es el desarrollado a través del ánodo de la carga de la resistencia.

La razón señal a ruido se mejora si el fotomultiplicador es enfriado a aproximadamente en un intervalo de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. La contribución de la corriente oscura puede ser reducida si la radiación incidente es enfocada a una pequeña área del fotocátodo, debido a que una fuente productora de esta corriente son las partículas altamente energéticas, muones o partículas β en la radiación de fondo causando centelleo en la ventana del tubo que ocasiona electroluminiscencia debida a los electrones perdidos sobre el cristal.

Sus características son similares a los tubos de vacío pero presenta un tiempo de respuesta más rápido y un mejoramiento en la razón señal a ruido debido a la baja corriente oscura y al ruido residual de cada dínodo, limitándose así al ruido de cada fotón o al ruido de la corriente oscura del cátodo residual. Su tiempo de respuesta es determinado por la amplitud de tiempo de recorrido empleado por los electrones entre cada estado y el diseño de la cadena de dínodos, llegando a obtener anchos de banda de hasta 100 MHz. Un método alternativo de obtener una alta ganancia del electrón es aplicando un campo eléctrico a través de la capa resistiva del canal multiplicador. Generalmente un tubo multiplicador contiene entre 10 y 15 capas de dínodos y un campo eléctrico constante entre capas sucesivas de aproximadamente 100 V, se han medido con este arreglo ganancias arriba de 10^9 .

Este tipo de fotomultiplicador puede ser usado con una variedad de fotocátodos dependiendo de la aplicación.

En una *placa microcanal (MCP)* cada canal tiene generalmente un diámetro entre $10\mu\text{m}$ a $20\mu\text{m}$ y una longitud de 0.5mm , por lo que es posible incorporar 2.5 millones de ellos en un plato de 25mm . Si se operan a aproximadamente 1 kV con una amplificación de 3000 su ganancia es limitada por una realimentación iónica que se incrementa debido al impacto ionizante con moléculas de gas residual, estos iones positivos son acelerados hacia atrás del tubo, donde pueden ganar energía suficiente para generar electrones secundarios si colisionan con la pared. Las paredes de los tubos pueden ser cubiertas con una capa delgada de aluminio que actúa como una barrera para los iones positivos obteniendo una vida más estable para el fotocátodo, sin embargo, hay evidencia que la eficiencia de recolección del fotoelectrón del MCP puede ser reducida debido a la limitación impuesta por el radio del área abierta. (Fig. 9)

Entre sus aplicaciones se encuentra la detección de muy bajo flujo de fotones, detección de cortos pulsos de radiación, detección de radiación ultravioleta. Una aplicación muy importante se encuentra en los tubos de imágenes, los cuales detectan una imagen óptica creando la correspondiente imagen formada con electrones, que puede ser redispersada como una imagen óptica o empleada para producir una imagen de carga. La imagen puede ser en visible, ultravioleta o infrarrojo, es enfocada a un fotocátodo semitransparente sensible a la región espectral correcta y los fotoelectrones son emitidos con una distribución de intensidad espacial que acompaña a la imagen enfocada, en el intensificador de imagen y tubos convertidores los electrones son acelerados hacia una pantalla de salida donde ellos reproducen la imagen original con un realce de la intensidad y una conversión de la longitud de onda dentro del visible.

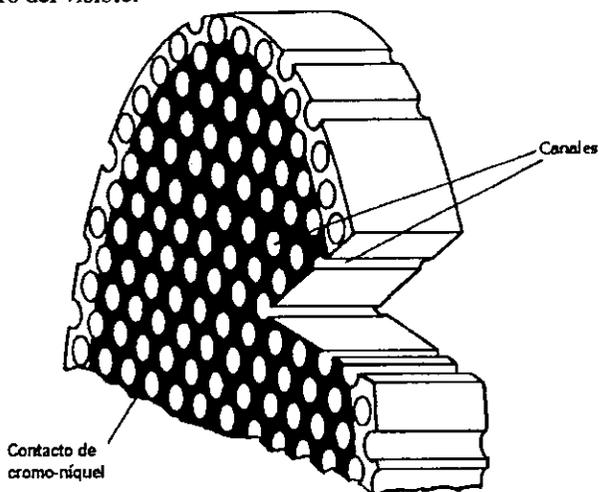


Fig. 9 Placa microcanal, representación esquemática [3].

1.4 DETECTORES TÉRMICOS

Al monitorear el cambio de la temperatura de un objeto es posible deducir la cantidad de energía de radiación absorbida, bajo esta propiedad se han creados los detectores térmicos, empleando para su activación un material altamente dependiente de la temperatura como la conductividad eléctrica o la expansión térmica. Debido a estas propiedades presentan un intervalo de respuesta espectral plano al compararla con los sistemas de fotones, un tiempo de respuesta relativamente bajo, del orden de milisegundos. En la tabla 2 [1] se presentan los detectores térmicos más comunes.

Su funcionamiento está basado en dos etapas:

- Determinar incrementos de temperatura del sistema debida a la radiación incidente.
- Determinar la señal de salida en función de cambios en la propiedad dependiente de la temperatura del detector.

La primera parte de este cálculo es común en todos los sistemas térmicos, pero el segundo proceso diferirá de sistema a sistema.

Presenta ruido NEP:
$$NEP = \left(\frac{16\sigma kT^5 A\Delta f}{\eta} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Consecuentemente la detectividad de un sistema ideal de área sensitiva unitaria con ancho de banda unitaria y una emitividad de una detección de radiación desde una fuente de cuerpo negro a 300K esta dada por $D^* = 1.81 \cdot 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$. Un mejoramiento en D^* se obtiene al operar al detector en un medio ambiente frío. Algunos detectores en particular los bolómetros han sido operados a temperaturas de helio líquido para probar y activar su sistema de funcionamiento.

El principio de detectores fríos para la prueba de su funcionamiento es aplicable principalmente a bolómetros y sistemas piroeléctricos como con otros sensores térmicos, sus propiedades dependientes de la temperatura son reducidas y por lo tanto se tiende a disminuir sus principales ventajas como detectores de fotones.

DETECTORES	MÉTODO DE OPERACIÓN
Termopila	Generación de voltaje, causado por el cambio de temperatura de la unión de dos materiales distintos.
Bolómetros	Cambio en conductividad eléctrica.
Celda Golay	Expansión térmica de un gas.
Sistemas Piroeléctricos y piromagnéticos	Cambios en propiedades magnéticas y eléctricas.
Evapógrafos	La velocidad de condensación de vapor en una membrana delgada.
Emisión termoiónica	Velocidad de emisión desde un cátodo revestido de óxido.
Convertidor detector del contorno de una imagen	Transmisión óptica de un semiconductor.
Sistemas de cristal líquido	Cambios de propiedades ópticas.

2

ABERRACIONES

Existen diversos tipos de aberraciones de acuerdo a cada sistema, en este caso las dividimos en dos tipos principales: Aberraciones Ópticas: las inherentes y las específicas de la cámara cuentafotones PIAS denominada Hamamatsu; y Aberraciones del Sistema completo debidas a la electrónica asociada y al equipo de cómputo.

2.1 POLINOMIOS DE ZERNIKE EN ÓPTICA

Dos funciones $f(x)$ y $\varphi(x)$ definidas en el intervalo $[a, b]$ son ortogonales si la integral en el intervalo $[a, b]$ de su producto interno es igual a cero.

$$\int_a^b f(x)\varphi(x)dx = 0$$

Zernike introduce los polinomios circulares: $U_n^m(x, y) = R_n^m(\rho) \cos m\varphi$ de dos variables reales, definidos dentro de un círculo unitario, donde x, y son coordenadas cartesianas, ρ, φ son coordenadas polares, $R_n^m(\rho)$ es un polinomio de grado n -ésimo en ρ , el cual no contiene potencias de ρ menores que m . A estos polinomios se les llama *Polinomios de Zernike*, también expresados por las relaciones:

$$Z_j = \begin{cases} \sqrt{n+1}R_n^m(\rho)\sqrt{2}\cos m\theta & j = \text{par}, m \neq 0 \\ \sqrt{n+1}R_n^m(\rho)\sqrt{2}\sin m\theta & j = \text{impar}, m \neq 0 \\ \sqrt{n+1}R_n^0(\rho) & m = 0 \end{cases} \quad y$$

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{n-m} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s!(n+m)/(2-s)!s!(n-m)/(2-s)!} \rho^{n-2s}$$

con n, m enteros que satisfacen $m \leq n, n-|m|=\text{par}$.

Forman un sistema completo ortogonal dentro de un círculo unitario, son invariantes con respecto a una rotación del sistema de coordenadas alrededor del eje z y cumplen la relación:

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} R_n^m(\rho) \cos m\varphi R_n^{m'}(\rho) \cos m'\varphi \rho d\rho d\varphi = \delta_m \delta_{m'}$$

Una de sus aplicaciones más importantes es en la descripción de las Aberraciones Ópticas.

Un trazado exacto de rayos o cualquier otro tipo de mediciones que puedan ser efectuadas en un sistema prototipo, mostrará algunas inconsistencias con la descripción ideal debida a la Teoría Paraxial, estas diferencias son conocidas con el nombre de **Aberraciones**.

Una aberración V puede ser expresada de manera matemática por la serie de potencias:

$$V = \sum_{lnm} b_{lnm} l^{2l+m} \rho^n \cos^m \varphi = \sum_{nm} a_{nm} \rho^n \cos^m \varphi$$

donde b_{lnm} son coeficientes constantes, l es la distancia desde el punto imagen al eje óptico y ρ, φ son las coordenadas polares en la pupila de salida. Esta representación presenta relaciones complicadas, por lo que Nijboer reemplaza la serie de potencias del coseno por los correspondientes armónicos $\cos(m\varphi)$, obteniendo la función de las **aberraciones clásicas**:

$$V = \sum_{lnm} b_{lnm} l^{2l+m} \rho^n \cos m\varphi = \sum_{lnm} a_{nm} \rho^n \cos m\varphi$$

Con esta sustitución Nijboer sugiere una nueva clasificación de las aberraciones, en el cual las aberraciones con el mismo índice m son del mismo tipo, es decir, si $m=2$ pertenece al tipo astigmatismo en donde ahora la diferencia va a radicar en el exponente de ρ para ser primario, secundario, etc. Con esta redefinición se llega a obtener una simplificación en el estudio de las curvas de aberraciones [5].

Nijboer combina de cierta forma las sucesiones finitas:

$$\rho^n \cos m\varphi, \rho^{n-2} \cos m\varphi, \dots, \rho^m \cos m\varphi$$

que representan las sucesiones de las aberraciones individuales para cada tipo obteniendo las *aberraciones ortogonales* en términos de los polinomios circulares $R_n^m(\rho) \cos m\varphi$:

$$V = \sum_{lmn} b_{lmn} l^{2l+m} R_n^m(\rho) \cos m\varphi = \sum_{nm} A_{nm} R_n^m(\rho) \cos m\varphi$$

Esta propiedad simplifica grandemente la solución de muchos problemas al desarrollar las aberraciones en series de acuerdo a los valores de m, n , en R , y al valor de los coeficientes A_{nm} . En la Tabla 3.1 vemos la expresión de los primeros polinomios Z_j asociados a aberraciones monocromáticas.

TABLA 3			
POLINOMIOS DE ZERNIKE			
m\ln	GRADO RADIAL 0	FRECUENCIA AZIMUTAL 1	2
1		$Z_2 = 2r \cos(\theta)$, Tilt $Z_3 = 2r \sin(\theta)$, tilt en posición lateral.	
2	$Z_4 = \sqrt{3}(2r^2 - 1)$ Desenfoque en posición long.		$Z_5 = \sqrt{6}r^2 \sin(2\theta)$ $Z_6 = \sqrt{6}r^2 \cos(2\theta)$ Astigmatismo de 3er.orden.
3		$Z_7 = \sqrt{8}(3r^3 - 2r) \sin(\theta)$ $Z_8 = \sqrt{8}(3r^3 - 2r) \cos(\theta)$ Coma 3er.Orden.	
4	$Z_{11} = \sqrt{5}(6r^4 - 6r^2 + 1)$ Aberración esférica.		

En la figura 10 se presentan las gráficas de diversas aberraciones para un espejo de telescopio, los polinomios de Zernike no nos describen la aberración exacta, pero si con un muy buen grado de aproximación.

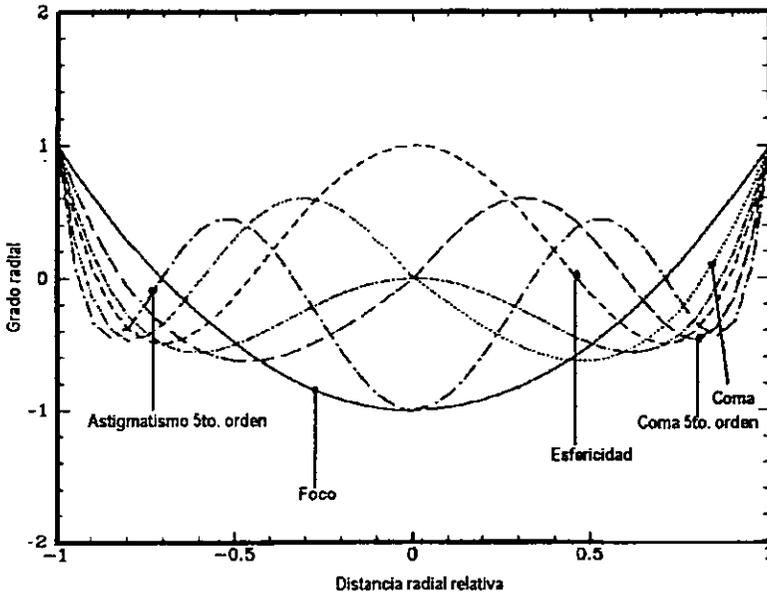


Fig. 10 Tipos de aberraciones presentados en un espejo de telescopio

2.2 ABERRACIONES INHERENTES A LA ÓPTICA

Al comparar una imagen real antes y después de un sistema óptico se observan ciertas diferencias en la última, estas diferencias son conocidas como aberraciones, existen dos clasificaciones principales de ellas: Aberraciones monocromáticas y cromáticas.

2.2.1 Aberraciones monocromáticas

Surgen cuando la luz es altamente monocromática, fueron estudiadas en detalle por primera vez por Ludwig von Seidel alrededor del año 1850 [6], por lo que también son conocidas como aberraciones de Seidel. En el presente trabajo solamente se considera el caso de aberraciones primarias⁸. Las aberraciones monocromáticas se dividen en dos grupos de acuerdo al tipo de modificación que le hacen a la imagen:

Deterioran la imagen haciéndola confusa:

- **Aberración esférica (AE).**- Corresponde a la distancia focal con la apertura para rayos no paraxiales. Los rayos que inciden en la superficie a mayores alturas sobre el eje óptico

⁸ Aberraciones primarias o de 1^{er}. orden.- Se consideran de Primer orden de acuerdo al desarrollo en series de los polinomios de Zernike.

co son enfocados antes o después del foco según sea el tipo de lente. Reducirá el contraste y degradará los detalles. (Fig. 11)

Formas de corrección: La AE puede reducirse diafragmando la abertura pero hay que tomar en cuenta que esto también reduce la cantidad de luz que entra al sistema.

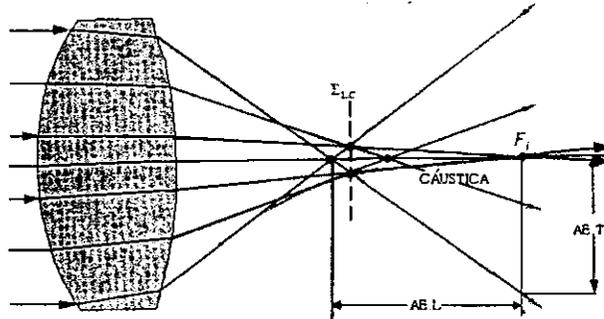


Fig. 11 Aberración esférica longitudinal y transversal [6].

- **Aberración Comática ó Coma (AC):** Su origen está en el hecho de que los planos principales pueden ser tratados como planos únicamente en la región paraxial, realmente son superficies curvas principales.

En la ausencia de aberración esférica un haz de rayos paralelos será enfocado en el punto axial F_i a una distancia focal posterior ($d.f.p.$) a partir del vértice posterior, pero las distancias focales efectivas y por lo tanto los aumentos transversales variarán para rayos que cruzan la lente fuera del eje. Cuando el punto imagen está sobre el eje óptico no hay presencia de AC , pero cuando el haz es oblicuo y los puntos de la imagen están fuera del eje su presencia es evidente. La dependencia del aumento transversal M_T con h , ($h =$ altura del rayo en la lente) se puede observar en la fig. 12, ahí los rayos meridionales que cruzan las orillas de la lente llegarán al plano imagen más cerca del eje que los rayos cercanos al rayo principal por lo tanto la amplificación más pequeña se asocia con los rayos marginales los cuales formarán la imagen más pequeña, en este caso se dice que la AC es negativa. Una AC es positiva cuando los rayos marginales están en foco a una distancia más alejada del eje.

Formas de corrección: Al igual que la Aberración Esférica, la aberración cromática depende de la forma de la lente. Emplear un diafragma en la posición apropiada. Se puede minimizar si al considerar el caso real de trabajo de puntos conjugados finitos, se emplean lentes corregidas por puntos conjugados al infinito, la cual es una técnica muy satisfactoria y muy usada.

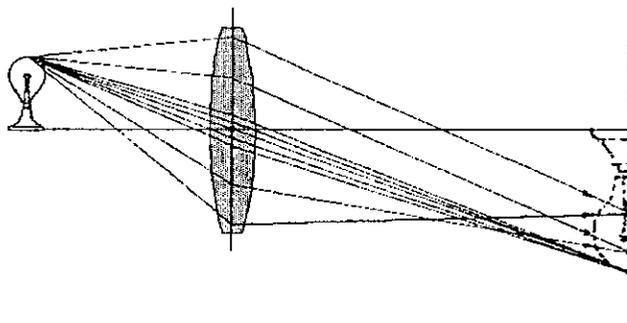


Fig. 12 Aberración comática negativa [6].

- *Astigmatismo.*- Al tener un punto objeto situado a una distancia considerable fuera del eje óptico, el cono de rayos incidentes sobre la lente será asimétrico, originando esta aberración.

Suponiendo que no hay Aberración esférica ni comática y teniendo dos distancias focales diferentes, el haz cónico de rayos incidente sufre una deformación considerable después de refractarse. La sección transversal del haz sale de la lente inicialmente con forma circular pero se va haciendo gradualmente elíptica, con el eje mayor en el plano sagital, (fig. 14), llegando a degenerarse en una línea (imagen primaria) en el foco meridional, más allá de este punto la sección recta del haz se abre rápidamente hasta volverse circular de nuevo, en esta posición la imagen es una mancha circular llamada el *círculo de mínima confusión*, separándose más de la lente, la sección recta se vuelve a deformar en una línea denominada imagen secundaria localizada en el plano meridional en el foco sagital F_s , conforme el objeto se aleja del eje óptico, la imagen se deteriora perdiendo definición a lo largo de los bordes, siendo siempre radial la imagen secundaria y perpendicular a ella la imagen primaria, causando el efecto de la figura 13.

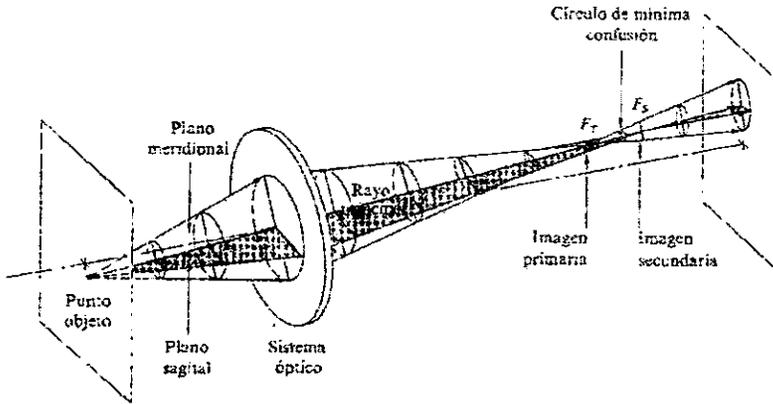


Fig. 13 Astigmatismo[6].

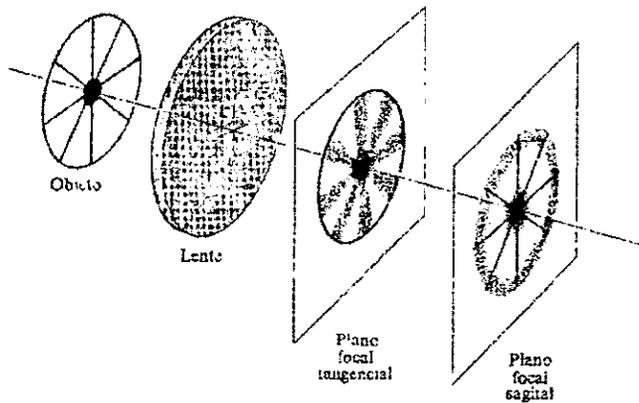


Fig. 14 Efecto del astigmatismo en los diferentes planos [6].

- Curvatura de campo.**- Considerando un sistema óptico libre de todas las aberraciones anteriores, entonces existe una correspondencia de uno a uno entre los puntos de las superficies objeto e imagen. El efecto de *campo plano de Petzval* se puede observar en la fig. 15. El segmento de un objeto esférico σ_o tiene como imagen un segmento esférico σ_i producido por una lente dada y ambos centrados en O , si se aplana σ_o en el plano σ_o cada punto objeto se moverá hacia la lente a lo largo del correspondiente rayo principal formando una *superficie parabólica de Petzval* Σ_p . Para una lente positiva esta superficie se curva hacia adentro, es decir, hacia el objeto plano. Para una lente negativa se curva en sentido contrario. Está íntimamente ligado a la

curvatura de campo ya que regularmente existen dos superficies imágenes paraboloideas.

Formas de corrección: Un arreglo adecuado de lentes positiva y negativa dará curvatura de campo igual a cero.

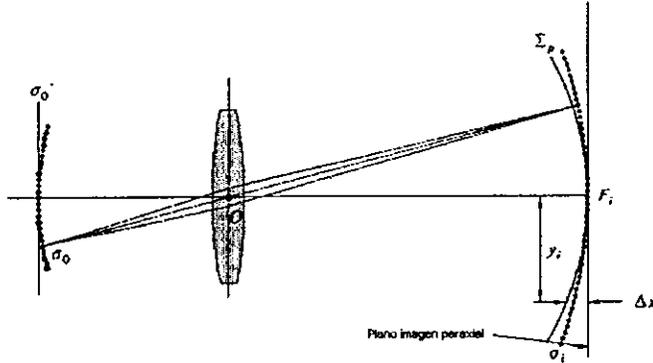


Fig. 15 Curvatura de campo[6].

- *Distorsión.*- Esta aberración es fundamental para el desarrollo del presente trabajo, debido a que el sistema a estudiar emplea una lente óptica, esto se describe con mayor detalle más adelante, Aberraciones del sistema detector - Hamamatsu.

Se debe al hecho de que el aumento transversal, M_T , puede ser una función de la distancia de la imagen al eje y_i , es decir, esta distancia puede diferir de que M_T sea una constante como lo predice la teoría paraxial. En ausencia de cualquiera de las otras aberraciones se manifiesta como una deformación de la imagen en su conjunto, aunque cada punto está nítidamente enfocado. Por lo tanto cuando la imagen es procesada por un sistema óptico que sufre *distorsión positiva o de corsé*, un arreglo cuadrado se deforma como se observa en la *fig. 16*, en este caso cada punto imagen se desplaza radialmente hacia afuera del centro con los puntos más distantes moviéndose una distancia mayor, es decir M_T aumenta con y_i . Similarmente la *distorsión negativa o de barril* corresponde a la situación donde M_T disminuye con la distancia al eje y_i .

Esta aberración se especifica porcentualmente, es decir: Si se tiene una imagen ideal, *fig.16a*, y se obtiene la imagen real *fig.16b* y *fig.16c*, para obtener la distorsión de la imagen se aplica la fórmula:

$$\text{distorsión(\%)} = \frac{dx}{x} \times 100$$

Se requiere especificar si la distorsión es positiva efecto de corsé (*fig.16b*), si es negativa, efecto de barril (*fig.16c*). Esta fórmula es aplicable a ambas direcciones.

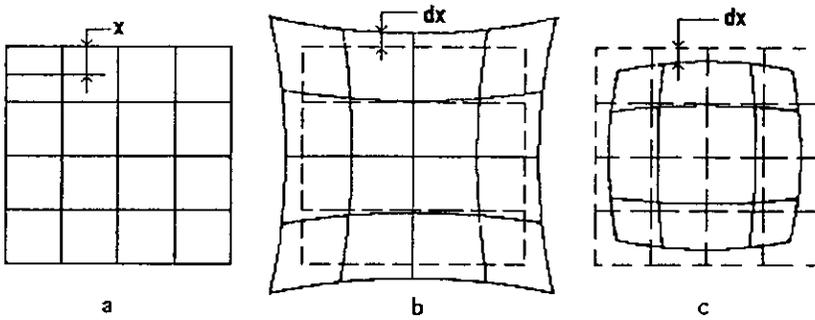


Fig. 16 Distorsión geométrica [6].

2.2.2 Aberraciones Cromáticas

Existen aberraciones cromáticas que surgen específicamente con luz policromática siendo por lo tanto más significativas. Dado que la ecuación de lentes delgadas depende de la longitud de onda a través de $n_f(\lambda)$ la distancia focal también variará como $\frac{1}{f} = (n_f - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$.

En general $n_f(\lambda)$ decrece con la longitud de onda en la región visible y por lo tanto $f(\lambda)$ aumenta.

Los colores constitutivos de un haz de luz blanca colimado son enfocados sobre diferentes puntos sobre el eje que al pasar a través de lentes dan origen a la aberración cromática axial, A.C.A., definida como la distancia axial para dos puntos focales comprendiendo un intervalo dado de frecuencias. (Fig. 17)

Cuando se ilumina con una fuente puntual policromática una lente convergente simple y gruesa producirá una imagen real rodeada por un halo. Si el plano de observación se mueve más cerca de la lente, la periferia de la imagen borrosa tendrá un tinte naranja-rojo, alejándolo de la lente más allá de la mejor imagen el contorno tendrá un tinte azul-violeta. La localización del círculo de mínima confusión corresponderá a la posición donde aparezca la mejor imagen, al observar la fuente a través de la lente la coloración será más evidente.

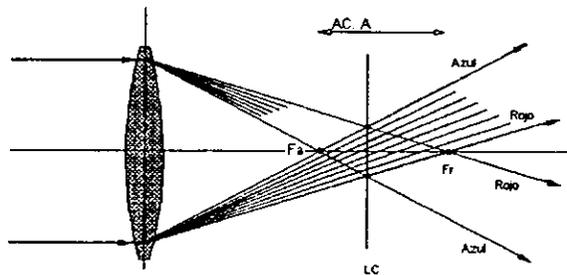


Fig. 17 Aberración cromática axial

La imagen de un punto fuera de eje estará formada por las frecuencias constitutivas cada una llegando a diferentes alturas arriba del eje por lo tanto la dependencia del foco con la frecuencia causará también una dependencia del aumento transversal con la frecuencia. La distancia vertical entre dos puntos imágenes es una medida de la aberración cromática lateral, AC.L o color lateral. En consecuencia una lente con aberración cromática iluminada con luz blanca llenará un volumen del espacio con un continuo de imágenes más o menos superpuestas variadas en tamaño y color. Cuando el foco azul, F_A , está a la izquierda del foco rojo, F_R , la A.C.A es positiva, por el contrario en una lente negativa los rayos color azul más fuertemente desviados parecen originarse de un punto más a la derecha del foco rojo. Para una lente convexa el foco rojo está más alejado y a la derecha; para la lente cóncava está más alejado y a la izquierda.(Fig. 18)

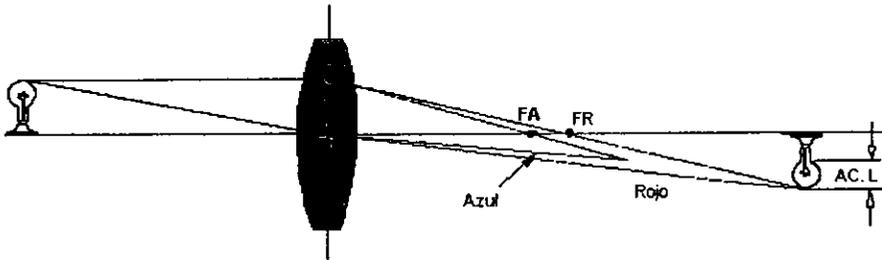


Fig. 18 Aberración cromática lateral

Formas de corrección: Para su corrección se han creado los dobletes acromáticos delgados y los dobletes acromáticos separados.

1.- **Dobletes acromáticos delgados.**- Se forman por la combinación de dos lentes delgadas, una positiva y una negativa. Para esta combinación los planos principales coinciden de tal manera que la distancia focal acromatizada corrige la A.C.A y la AC.L. En un doblete de lentes gruesas aún cuando las distancias focales para el azul y el rojo son idénticas los planos principales para otras longitudes de onda serán diferentes en consecuencia, a pesar de obtener un mismo aumento para todas las longitudes de onda los puntos focales pueden no coincidir es decir, AC.L será corregida pero AC.A no porque no es posible que todas las longitudes de onda que atraviesan un doblete tengan un mismo foco. El cromatismo residual obtenido se conoce como espectro secundario.

2.- **Dobletes acromáticos separados.**- Es posible acromatizar la distancia focal de un doblete compuesto por dos elementos separados a cierta distancia y del mismo vidrio. Tomando la frecuencia del amarillo como referencia se obtiene

$$d = \frac{(f_{1\text{Amarillo}} + f_{2\text{Amarillo}})(n_{\text{Amarillo}} - 1)}{n_{\text{Azul}} + n_{\text{Rojo}} - 2}$$

considerándose previamente que las distancias focales

del azul y rojo son las mismas pero solamente es posible corregir una de las dos aberraciones en el sistema.

2.3 ABERRACIONES DEL SISTEMA DETECTOR - HAMAMATSU.

El sistema detector Hamamatsu está compuesto por cuatro diferentes secciones, el detector, el sistema de enfriamiento, el sistema de adquisición y el sistema óptico. Cada una de ellas es una fuente de aberraciones que modifican la información adquirida de la imagen observada se ven reflejados. La descripción detallada de cada sección y del sistema completo se presenta en el capítulo 4. A continuación se mencionan de manera global las posibles fuentes que contribuyen a las aberraciones del sistema, un análisis detallado de cada una de ellas se presenta en el capítulo 5.

2.3.1 Aberraciones ópticas

Para la adquisición de imágenes a través del detector Hamamatsu, se requiere emplear una lente óptica, (Fig. 19). Por ser un componente óptico no se encuentra excluido de ser fuente de aberraciones y debido al objetivo del presente trabajo es una fuente determinante. Es la única fuente de aberraciones ópticas del sistema completo⁹.

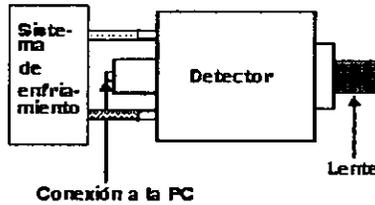


Fig. 19 Posición de la lente Nikon en el sistema

2.3.2 Aberraciones por ruido y linealidad electrónica.

Conforman las aberraciones intrínsecas del detector y las originadas por el sistema de adquisición y el sistema de enfriamiento.

2.3.2.1 Aberraciones intrínsecas del detector

Producidas por el diseño, construcción y modo de operación del detector. Las aberraciones que presentan son:

⁹ Capítulo 5

1. *Aberración de Distorsión Geométrica.*- Presenta una deformación de la imagen a lo largo de ambos ejes, obtener su valor es la finalidad principal del presente trabajo.
2. *Sesgo Térmico.*- Es la señal que se obtiene cuando el detector se encuentra cerrado, depende de la construcción del detector y del sistema diseñado para mantener al detector a su temperatura óptima de operación. La descripción detallada de este sistema se encuentra en el capítulo 4.
3. *Campo Plano.*- Al obtener la gráfica en 3 dimensiones de una imagen plana, se debe obtener un plano perfecto es decir, todos los puntos están a la misma altura. En presencia de campo plano se obtiene la gráfica tridimensional con diferentes alturas en ciertas regiones, para su corrección se aplica el método llamado corrección de campo plano.

Este tipo de aberraciones dependen de las especificaciones del detector para cada elemento del sistema y por la electrónica de control externa que requiere. Las especificaciones son presentadas a continuación.

2.3.2.1.1 Distorsión en el tubo

La resolución espacial del arreglo (fotocátodo y juego de placas microcanales) es de 10 líneas/mm con una distorsión en la posición menor del 3%.

2.3.2.1.2 Degradación

1. Presenta una región a lo largo de la dirección horizontal cercana al eje central, en donde la reducción máxima de la sensibilidad es del 50%.
2. Gran parte de la señal que llega al convertidor D/A se deteriora ocasionando una reducción de la sensibilidad de un 10%.

2.3.2.2 Aberraciones producidas por los sistemas de adquisición y de enfriamiento

1. *Analizador de Posición (C1816).*- Depende de la precisión de conversión. Es decir del convertidor analógico digital de 9 bits, (A/D 9 bits).[Capítulo 4]
2. *Desplazamiento del punto central.*-Se presenta en el despliegue de la imagen en la PC. El centro de la imagen se encuentra desplazado con respecto al eje vertical, por lo que al ser desplegada la imagen no se le observa delimitada totalmente por la ventana del detector.
3. *Ruido térmico.*- Depende del buen funcionamiento del sistema de enfriamiento, debido a que una temperatura mayor a los 50 °C incrementará el ruido y producirá mal funcionamiento del detector. El sistema de enfriamiento implementado al sistema completo evita que la temperatura del detector sea mayor o igual a los 50 °C. [Capítulo 4]

3

TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Una vez que se han adquirido las imágenes se requiere aplicarles determinados tratamientos para obtener la información útil para nosotros, como pueden ser la relación en las intensidades, comparación, etc. Una de las herramientas más empleadas para estos fines son las transformaciones. El presente capítulo es fundamental debido a que provee las bases para la comprensión del método a emplear para cumplir el objetivo del presente trabajo.

3.1 TRANSFORMADAS DE LA IMAGEN

El proceso digital de imágenes consiste en el procesamiento de un dibujo bidimensional por una computadora. Una imagen digital es un arreglo de números reales o complejos, representados por un número finito de bits. Primero es digitalizada y almacenada como una matriz de dígitos binarios en la memoria de la computadora, entonces puede ser procesada y desplegada sobre un monitor de alta resolución. Para desplegarla se almacena en una dirección de memoria de acceso rápido (buffer), el cual refresca el monitor a 30 veces/s para producir una visibilidad de despliegue continuo, finalmente para controlar y comunicar todo este procedimiento se requieren de mini o microcomputadoras.

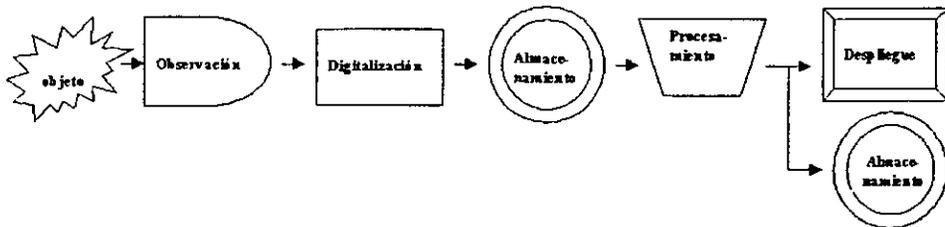


Fig. 20 Secuencia típica del procesamiento digital de una imagen.

En general cualquier función de dos dimensiones que guarda información puede ser considerada una imagen. La representación de una imagen esta involucrada con la caracterización de la cantidad que representa cada elemento de dibujo (píxel).

Una imagen continua será representada como una función de dos variables independientes, $f(x,y)$, por lo tanto un gran número de sistemas de imágenes pueden ser modelados como sistemas lineales de dos dimensiones, es decir $y(m,n)=H[x(m,n)]$ con $x(m,n)$ las entradas y $y(m,n)$ las salidas. Una vez modelada se requiere aplicarle un mejoramiento, restauración, codificación y descripción, para lo cual la teoría de las transformadas desarrolla un papel clave en estos procedimientos, a continuación se presentan las transformadas más empleadas.

3.1.1 Transformada de Fourier (T.F.)

Forma parte de un grupo de transformadas que pueden expresarse en términos de la relación general:

$$T(u) = \sum_{x=0}^{N-1} f(x)g(x,u)$$

con $T(u)$ la transformada de $f(x)$ y $g(x,u)$ el núcleo de la transformación directa, u toma valores en el intervalo $0,1,2,\dots, N-1$.

De forma similar, la transformada inversa es la relación:

$$f(x) = \sum_{u=0}^{N-1} T(u)h(x,u)$$

donde $h(x,u)$ es el núcleo de la transformación inversa y x toma valores en el intervalo $0,1,2,\dots,N-1$.

Para un sistema bidimensional la definición de núcleo es la misma. Sea $g(x,y,u,v)$ el núcleo de una transformación directa bidimensional, es separable si cumple la relación $g(x,y,u,v)=g_1(x,u)f_2(y,v)$, se le llama simétrico si g_1 es funcionalmente idéntica a f_2 .

En la tabla 4 la definimos para una y dos dimensiones, directas e inversas, casos continuos y discretos.

TABLA 4

En una dimensión	Continuo	Discreto, $x=0,1,2,\dots,M-1$ e $y=0,1,2,\dots,N-1$.
Directa	$\mathcal{F}\{f(x)\}=F(u)=\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\exp(-j2\pi ux)dx$	Análogo a dos dimensiones
Inversa	$\mathcal{F}^{-1}\{F(u)\}=f(x)=\int_{-\infty}^{\infty} F(u)\exp(j2\pi ux)du$	Análogo a dos dimensiones
Bidimensional:	$f(x,y)$ es continua e integrable y $F(u,v)$ es integrable	
Directa	$\mathcal{F}\{f(x,y)\}=F(u,v)=\iint_{-\infty}^{\infty} f(x,y)\exp[-j2\pi(ux+vy)]dxdy$	$F(u,v)=\frac{1}{MN}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1} f(x,y)\exp[-j2\pi(ux/M+vy/N)]$
Inversa	$\mathcal{F}^{-1}\{F(u,v)\}=f(x,y)=\iint_{-\infty}^{\infty} F(u,v)\exp[j2\pi(ux+vy)]dudv$	$f(x,y)=\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1} F(u,v)\exp[j2\pi(ux/M+vy/N)]$

Definimos las siguientes propiedades para dos dimensiones siendo análogas para una:

Espectro de Fourier de la función: $|F(u, v)| = [R^2(u, v) + I^2(u, v)]^{\frac{1}{2}}$

Ángulo fase ó fase : $\phi(u, v) = \tan^{-1} \left[\frac{I(u, v)}{R(u, v)} \right]$

Espectro de potencia : $P(u, v) = |F(u, v)|^2 = R^2(u, v) + I^2(u, v)$

3.1.1.1 Propiedades de la Transformada de Fourier (T.F.)

El intervalo dinámico del espectro de Fourier es habitualmente mucho mayor de lo que los sistemas de visualización ordinarios son capaces de reproducir fielmente, en cuyo caso sólo las partes más brillantes de la imagen son visibles en la pantalla.

Algunas propiedades de la Transformada de Fourier (T.F.) en dos dimensiones:

1. *Espacio de frecuencias*: Si $f(x,y)$ es luminiscencia y (x,y) las coordenadas espaciales, entonces (u,v) son las frecuencias espaciales que representan cambios de luminiscencias con respecto a distancias espaciales. Las unidades de (u,v) son recíprocas de (x,y) respectivamente. Algunas veces las coordenadas (x,y) están normalizadas por la distancia visual de la imagen $f(x,y)$, entonces las unidades de (u,v) son ciclos por grado del ángulo visual.
2. *Unicidad*: Para funciones continuas, $f(x,y)$ y $F(u,v)$ son únicas con respecto a cualquiera otra. No hay pérdida de información si en vez de preservar la imagen se preserva su T. F.

3. *Separabilidad*: La transformada bidimensional se puede realizar por una sucesión de transformaciones unidimensionales a lo largo de cada una de las coordenadas espaciales.
4. *Traslación*: Si se multiplica $f(x,y)$ por el término $\exp[j2\pi(u_0x + v_0y)]$ y se toma su transformada, se obtiene un desplazamiento del origen del plano de frecuencias al punto (u_0, v_0) . De manera similar, al multiplicar $F(u,v)$ por el término $\exp[j2\pi(ux_0 + vy_0)]$ y aplicar la transformada inversa, se mueve el origen del plano espacial hasta el punto (x_0, y_0) .
5. *Periodicidad y Simetría conjugada*.- La T. F. y su inversa en funciones continuas y discretas son de período 2π y N respectivamente.
Si $f(x,y)$ es real, la transformada presenta simetría conjugada, es decir: $F(u,v)=F^*(-u,-v)$, ó $|F(u,v)|=|F(-u,-v)|$. Esta propiedad indica que el módulo de la transformada está centrada en el origen.
6. *Rotación*: Al expresar las coordenadas cartesianas en polares, las funciones $f(x,y)$ y $F(u,v)$, se convierten en $f(r,\theta)$ y $F(\omega, \phi)$, es decir, al hacer girar $f(x,y)$ un ángulo θ_0 , $F(u,v)$ gira el mismo ángulo, de manera similar al ser aplicado primero a la transformada inversa.
7. *Distributividad y Cambio de escala*: La T. F. y su inversa son distributivas respecto a la suma pero no respecto a la multiplicación. En cuanto al cambio escalar se cumplen las siguientes relaciones para dos escalares a y b :

$$af(x, y) \Leftrightarrow aF(u, v)$$

$$f(ax, by) \Leftrightarrow \frac{1}{|ab|} F(u/a, v/b)$$

8. *Respuesta de frecuencias y funciones propias de sistemas invariantes de cambio*.- Una función propia de un sistema es definida como una función de entrada que es reproducida a la salida con un posible cambio únicamente en la amplitud.
Las funciones propias de la T.F. están dadas por $\exp[j2\pi(ux + vy)]$, por lo tanto, para cualquier (u, v) fijo la salida de un sistema lineal de cambio invariante debe ser:
 $g(x, y) = H(u, v)\exp[j2\pi(u_1x + v_1y)]$, con H la T. F. del impulso de respuesta. También se le conoce como Respuesta de Frecuencias del sistema.
9. *Convolución*.- Es una de las dos propiedades de la T. F. que constituyen la unión fundamental entre los dominios espacial y de frecuencias.
La convolución de dos funciones $f(x)$ y $g(x)$, indicada por $f(x)*g(x)$ se define:

$$f(x) * g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha)g(x-\alpha)d\alpha,$$

α una variable muda para la integración.(Fig. 21)

Dadas dos funciones conocidas $f(x)$ y $g(x)$,

- Se forma la función $g(x-\alpha)$: se invierte $g(\alpha)$ alrededor del origen para obtener $g(-\alpha)$ y se desplaza un valor x .
- Para cada valor de x se multiplica $f(\alpha)$ por $g(x-\alpha)$
- Integra entre $-\infty$ y $+\infty$.

La convolución de una función $f(x)$ con la función delta de Dirac o impulso $\delta(x-x_0)$ se define por la relación:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\delta(x-x_0)dx = f(x_0).$$

La importancia de la convolución en el análisis en el dominio de frecuencias radica en el hecho que $f(x)*g(x)$ y $F(u)G(u)$ constituyen un par de T. F., es decir, si $f(x)$ tiene como transformada a $F(u)$ y $g(x)$ tiene como transformada a $G(u)$ entonces $f(x)*g(x)$ tiene como T. F. a $F(u)G(u)$, por lo tanto la convolución en el dominio de las x se puede obtener realizando la transformada de $F(u)G(u)$. La convolución en el dominio de las frecuencias se reduce a la multiplicación en el dominio de las x . El teorema de convolución está dado por:

$$f(x) * g(x) \Leftrightarrow F(u)G(u)$$

$$f(x)g(x) \Leftrightarrow F(u) * G(u)$$

La mecánica de la convolución discreta es esencialmente la misma que la de la convolución continua, la única diferencia son que los desplazamientos tienen lugar en forma de incrementos discretos correspondientes con la separación entre las muestras, y que una sumatoria sustituye a la integral.

La convolución bidimensional es análoga. Así para dos funciones $f(x,y)$ y $g(x,y)$

$$f(x, y) * g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta)g(x-\alpha, y-\beta)d\alpha d\beta$$

Teorema de convolución:

$$f(x, y) * g(x, y) \Leftrightarrow F(u, v)G(u, v)$$

$$f(x, y)g(x, y) \Leftrightarrow F(u, v) * G(u, v)$$

El caso discreto bidimensional es análogo al caso unidimensional, ahora con dos variables.

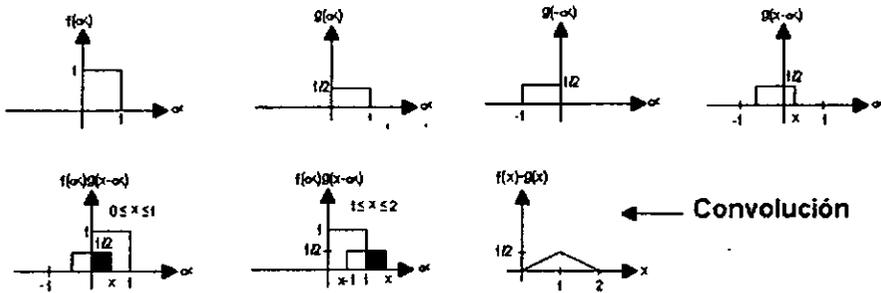


Fig. 21 Convolución. [18]

10. **Correlación.**- La correlación o correlación cruzada de dos funciones continuas $f(x)$ y $g(x)$ representada por $f(x) \circ g(x)$, se define por la relación:

$$f(x) \circ g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\alpha)g(x+\alpha)d\alpha$$

donde * es el complejo conjugado.(Fig.22)

Las fórmulas de convolución y correlación son similares, siendo la única diferencia que la función $g(x)$ no se invierte sobre el origen. Así para realizar la correlación cruzada simplemente se desplaza $g(x)$ sobre $f(x)$ y se integra el producto desde $-\infty$ hasta $+\infty$, para cada valor de desplazamiento x .

Su equivalente discreto se define como: $f_c(x) \circ g_c(x) = \sum_{m=0}^{M-1} f_c^*(M)g_c(x+m)$.

En el caso bidimensional, si $f(x,y)$ y $g(x,y)$ son funciones de variables continuas y su correlación cruzada se define como:

$$f(x,y) \circ g(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\alpha,\beta)g(x+\alpha,y+\beta)d\alpha d\beta \quad \text{caso continuo}$$

$$f_c(x,y) \circ g_c(x,y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_c^*(m,n)g_c(x+m,y+n) \quad \text{caso discreto}$$

Tanto en el caso continuo como en el caso discreto, se cumple el siguiente Teorema de Correlación.

$$f(x, y) \circ g(x, y) \Leftrightarrow F^*(u, v)G(u, v)$$

$$f^*(x, y)g(x, y) \Leftrightarrow F(u, v) \circ G(u, v)$$

Cuando se emplea para variables discretas se supone que todas las funciones son extendidas y periódicas.

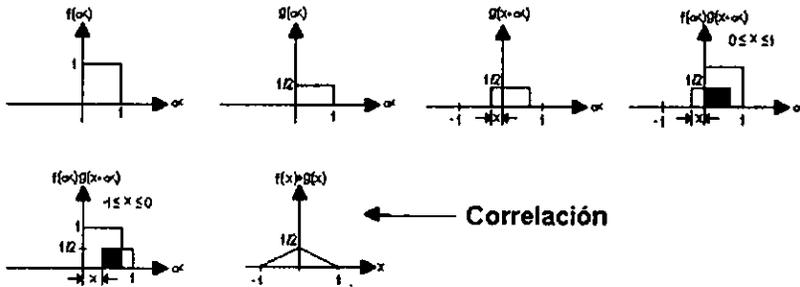


Fig. 22 Correlación cruzada [18].

3.1.2 Transformada Rápida de Fourier (TRF)

El número de sumas y multiplicaciones complejas requeridas para implementar la T.F. discreta es proporcional a N^2 , aplicándole una descomposición apropiada se puede hacer que el número de multiplicaciones y sumas sea proporcional a $N \log_2 N$, a este procedimiento se le denomina algoritmo de la transformada rápida de Fourier, esta reducción representa un considerable ahorro en tiempo de cálculo, además la aproximación de la TRF proporciona una apreciable ventaja de cálculo sobre el cálculo directo de la T. F.

Existen otras transformadas de la imagen que también son separables, como: Transformada discreta del coseno (TDC), transformada discreta del seno (TDS), Transformada de Walsh, transformada de Hadamard, transformada de Haar, transformada de Slant, transformada de Hotelling o KL, transformada unitaria de familias sinusoidales. Su estudio no es el propósito del presente trabajo. [18]

3.2 TEOREMA DE MUESTREO

Tomando como herramientas la T. F. y el teorema de convolución, se puede obtener la información necesaria para saber cuantas muestras se requieren para no perder información en el proceso de muestreo, es decir:

Si una función se extiende de $-\infty$ a ∞ , supóngase que la T. F. de $f(x)$ se anula para valores de u fuera del intervalo $[-W, W]$. Cada función con esta propiedad se considera una función de banda limitada ó función con soporte acotada.

Para obtener la versión muestreada de $f(x)$ se multiplica por una función de muestreo $s(x)$, que consiste en deltas de Dirac separadas un Δx cada una, también se le conoce como tren de impulsos. Por el teorema de convolución la multiplicación en el dominio de las x es equivalente a la convolución en el dominio de frecuencias, por lo tanto la T. F. se ha obtenido del producto $s(x)f(x)$ con periodo $1/\Delta x$ siendo posible que las repeticiones de $F(u)$ se traslapen, para evitar este problema se selecciona el intervalo de muestreo Δx con $\Delta x \leq \frac{1}{2W}$. Entonces la transformada inversa de $F(u)$ proporciona la función continua original $f(x)$.

La recuperación completa de una función de banda limitada a partir de muestras cuyo espaciado cumpla la relación anterior se conoce como *Teorema del muestreo de Whittaker-Shannon*. Toda la información en el dominio de las frecuencias de una función de banda limitada se encuentra en el intervalo $[-W, W]$, sin embargo si la relación anterior no se cumple, la transformada en ese intervalo se corrompe debido a las contribuciones de los períodos adyacentes, a este fenómeno se le conoce como *replicación* e impide la recuperación completa de una función deficientemente muestreada.

Los resultados anteriores son aplicables a funciones con una duración ilimitada en el dominio de la x , es decir en un intervalo de muestreo infinito. A continuación se hace un análisis de muestreo finito.

Tomando el intervalo $[0, X]$ en donde la separación entre muestras cumple con el teorema de muestreo. El resultado final en el dominio de las frecuencias se obtiene haciendo la convolución $[S(u)*F(u)]$ con $H(u)$, la T. F. con la función ventana $h(x)$. Puesto que $H(u)$ tiene componentes de frecuencia que se extienden hasta infinito, la convolución de esas funciones introduce una distorsión en la representación en el dominio de las frecuencias de toda función muestreada que haya sido limitada a una región finita por $h(x)$, de esta forma incluso si la separación entre muestras verifica el teorema de muestreo es generalmente imposible recuperar completamente una función que haya sido muestreada solamente en una región finita del dominio de las x .

Para obtener una transformada discreta de Fourier simplemente se necesita "muestrear" la transformada continua con un tren de impulsos que estén separados Δu , como ya se señaló, el muestreo puede representarse como un tren de impulsos multiplicados por alguna función de interés. La operación equivalente en el dominio de las x es la convolución que proporciona una función periódica, de periodo $1/\Delta u$, si se toman N muestras de $f(x)$ y de $F(u)$ y los espacios entre muestras están seleccionados de tal forma que un periodo de cada dominio está cubierto por N muestras uniformemente separadas, entonces $N\Delta x = X$ en el dominio de las x , y $N\Delta u = 1/\Delta x$ en el dominio de las frecuencias basándose en la propiedad de periodicidad de la transformada y cumpliendo el teorema de muestreo.

Los conceptos de muestreo anteriores son directamente aplicables a las funciones bidimensionales, aplicando para este caso la función de impulso bidimensional $\delta(x, y)$.

3.3 MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN

Los conceptos de muestreo anteriores son directamente aplicables a las funciones bidimensionales, aplicando para este caso la función de impulso bidimensional $\delta(x,y)$.

El objetivo principal de esta sección es mencionar las técnicas útiles para mejorar una imagen de manera que resulte más adecuada que la original para alguna aplicación específica. Las aproximaciones presentadas pertenecen a dos categorías básicas: métodos en el dominio espacial y métodos en el dominio de la frecuencia.

3.3.1 Métodos en el dominio espacial

El dominio espacial se refiere al propio plano de la imagen y las técnicas de esta categoría se basan en la manipulación directa de los píxeles que conforman la imagen, comenzaremos con las técnicas de mejora de la imagen considerando los métodos de procesamiento que se basan sólo en la intensidad de píxeles individuales (Mejoramiento por procesamiento de punto). Empleamos s y r para indicar la intensidad de los píxeles antes y después del procesamiento respectivamente.

3.3.1.1 Transformaciones de intensidades simples:

- *Negativos de imágenes.*- Invierte el orden de blanco a negro de forma que la intensidad de la imagen de salida disminuya conforme la intensidad de la imagen de entrada aumente. (Fig. 23)
- *Aumento del contraste.*- Las imágenes con poco contraste se pueden deber entre otras causas a iluminación deficiente, falta de intervalo dinámico en el sensor o incluso a la incorrecta selección de apertura de la lente durante la captación de la imagen. Por lo tanto la idea en las técnicas de aumento del contraste consiste en incrementar el intervalo dinámico de los niveles de gris de la imagen. (Fig. 23)
- *Compresión del intervalo dinámico.*- A veces el intervalo dinámico de una imagen procesada excede ampliamente la capacidad del dispositivo de presentación, en cuyo caso solo las partes más brillantes de la imagen aparecerán en la pantalla. Una manera efectiva de comprimir el intervalo dinámico de los valores de cada píxel consiste en realizar la siguiente transformación de intensidad: $s=c \log(1+|r|)$ donde c es un factor de escala y la función \log realiza la compresión deseada. (Fig. 23)
- *Fraccionamiento del nivel de gris.*- Frecuentemente se desea destacar un intervalo específico del nivel de gris de una imagen, existen varias formas de hacer el fraccionamiento siendo la mayoría variaciones de dos ideas básicas: La *primera* consiste en adjudicar un valor alto a todos aquellos niveles de gris del intervalo de interés y un valor bajo a los restantes, Fig. 23. La *segunda* basada en la transformación, Fig. 23, intensifica el intervalo de niveles de gris deseado, pero al mismo tiempo preserva el fondo y las tonalidades de gris.

- **Fraccionamiento de los planos de bits de la imagen.** En lugar de destacar ciertos intervalos de intensidades a veces puede desearse destacar la contribución que realizan a la imagen determinados bits específicos. Es decir, suponemos que cada píxel de una imagen viene representado por 8 bits y que la imagen está compuesta de 8 planos de un bit que van desde el plano 0 para el bit menos significativo hasta el plano 7 para el bit más significativo, destacando que tan sólo los cinco bits de mayor orden contienen datos significativos visualmente, los otros planos contribuyen en los detalles de la imagen. (Fig. 23)

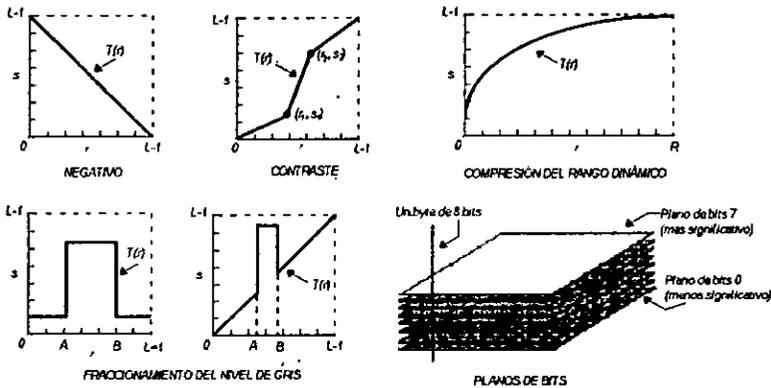


Fig. 23 Transformaciones de intensidades simples, los ejes x y y representan los intervalos de niveles de grises antes y después del procesamiento, respectivamente.

3.3.1.2 Procesamiento de histogramas

El histograma de una imagen digital con niveles de gris en el intervalo $[0, L-1]$ es una función discreta $p(r_k) = n_k/n$, donde: r_k es el k -ésimo nivel de gris, n_k el número de píxeles de la imagen con ese nivel de gris, n el número total de píxeles de la imagen y $k=0,1,2,\dots,L-1$. De manera general se puede decir que $p(r_k)$ da una idea del valor de la probabilidad de que aparezca el nivel de gris r_k . La representación gráfica de esta función para todos los valores de k proporciona una descripción global de la apariencia de una imagen, si tiene apariencia oscura o brillante, si su intervalo dinámico es estrecho y por lo tanto la imagen presenta bajo contraste o si es amplio es lo contrario, aunque estas propiedades que se pueden leer en el histograma solamente son descripciones globales no indican nada específico sobre el contenido de la imagen. Siempre se considera $r=0$ el negro y $r=L-1$ el blanco. Para cada r del intervalo nos centramos en las transformaciones de la forma $s=T(r)$, que producen un nivel s para cada valor de píxel r de la imagen original, la transformación verifica las condiciones:

- a.- $T(r)$ es de valor único y monótonamente creciente en el intervalo $0 \leq r \leq 1$, preserva el orden entre blanco y negro de la escala de grises, y
 b.- $0 \leq T(r) \leq 1$ para $0 \leq r \leq 1$, garantiza una aplicación que es coherente con el intervalo de valores de píxel permitidos.

Para poder ser de aplicación en el procesamiento digital de imágenes se consideran los valores discretos. La probabilidad para los niveles de gris que constituyen los valores discretos es:

$p_r(r_k) = \frac{n_k}{n}$ y su ecuación de transformación esta dada por:

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} = \sum_{j=0}^k p_r(r_j)$$

para $0 \leq r_k \leq 1$ y $k=0,1,\dots,L-1$.

A continuación se presentan métodos para manipular un histograma.

- *Ecuación de un histograma.*- La obtención de un histograma uniforme se conoce como *ecualización del histograma o linealización del histograma*.
- *Especificación del histograma.*- Es un método muy útil pero no conduce por sí mismo a las aplicaciones interactivas de mejoramiento de la imagen ya que sólo es capaz de generar un único resultado: una aproximación a un histograma plano. Algunas veces se requiere tener la posibilidad de especificar determinados perfiles del histograma capaces de destacar intervalos específicos de gris de la imagen. Si tenemos niveles de gris continuos y a $p_r(r)$ y $p_z(z)$ las funciones de probabilidad original y deseada respectivamente, el procedimiento se puede resumir en los siguientes pasos:
 1. Ecuación de los niveles de la imagen original utilizada empleando la función de transformación.
 2. Especificar la función de densidad deseada y obtener la función de transformación: $v = G(z) = \int_0^z p_z(w)dw$
 3. Aplicar la función de transformación inversa, $z=G^{-1}(s)$ a los niveles obtenidos en 1.

Este procedimiento produce una versión procesada de la imagen original que tiene unos nuevos niveles de gris caracterizados por la densidad $p_z(z)$, este método implica dos funciones de transformación lo cual quiere decir que una imagen no necesita que la ecualización del histograma se realice explícitamente. La dificultad principal para aplicar este método a la mejora de la imagen consiste en ser capaz de construir un histograma significativo, existen dos soluciones al problema:

1. Especificar una función de densidad de probabilidad particular (una densidad gaussiana por ejemplo) y luego formar un histograma digitalizando la función dada.

2. Especificar la forma del histograma por medio de un dispositivo gráfico, una pantalla interactiva o un tablero de gráficos, cuya salida se introduzca en el procesador ejecutando el algoritmo de especificación del histograma.
- *Mejoramiento local.*- Solamente he presentado procesos de mejoramiento de una imagen de manera global pero a veces se requiere un mejoramiento de detalles sobre áreas pequeñas.

Este tipo de procesamiento consiste en definir un entorno rectangular y mover su centro píxel a píxel. Para cada ubicación, se calcula el histograma de los puntos en el entorno, se obtiene su ecualización o su función de transformación, esta función se emplea para trazar el nivel de gris del píxel del centro del entorno y finalmente se mueve este centro a un píxel adyacente repitiéndose el proceso. Como sólo cambia una nueva fila o columna del entorno durante la traslación píxel a píxel se puede actualizar el histograma obtenido para la posición anterior con los nuevos datos introducidos en cada etapa. Este proceso tiene como ventaja el ahorro de tiempo.

La mejora local también se puede basar en propiedades de intensidad de los píxeles del entorno, como el valor medio y la varianza, ya que la media y la varianza del promedio del brillo es una medida del contraste.

3.3.1.3 *Sustracción de Imágenes*

La diferencia entre dos imágenes $f(x,y)$ y $g(x,y)$ se obtiene calculando la diferencia entre todos los pares de píxeles correspondientes de f y h dada la relación: $g(x,y)=f(x,y) - h(x,y)$.

3.3.1.4 *Promediado de la imagen*

Al considerar una imagen $g(x,y)$ compuesta por la suma de la función de ruido $\eta(x,y)$ y la imagen original $f(x,y)$, es decir: $g(x,y) = \eta(x,y) + f(x,y)$, se considera la hipótesis de que en cada par de coordenadas (x,y) el ruido es una función sin correlación y tiene un valor medio cero. El objetivo es reducir los efectos del ruido a base de sumar un conjunto de imágenes $\{g(x,y)\}$.

3.3.1.5 *Filtrado espacial*

El empleo de máscaras espaciales para el procesamiento de las imágenes se denomina *Filtrado Espacial* y las máscaras *Filtros Espaciales*. Los filtros lineales se basan en que la función de transferencia y el impulso o función de distribución puntual de un sistema lineal son transformadas de Fourier inversas de un sistema lineal. Con independencia del tipo de filtro lineal a emplear, la aproximación básica consiste en sumar productos entre los coefi-

cientes de la máscara y las intensidades de los píxeles bajo la máscara de un punto determinado de la imagen. Los filtros espaciales no lineales operan también en entornos, sin embargo en general su operación se basa directamente en los valores de los píxeles en el entorno en consideración.

Se clasifican en:

- *Filtros Suavizantes.*- Se emplean para reducir el ruido y hacer que la imagen aparezca algo borrosa.
- *Filtrados Realzantes.*- Su objetivo principal es destacar los detalles finos o intensificar detalles que han sido difuminados en una imagen.

El procesamiento en el dominio de la frecuencia así como el de las imágenes en color salen del propósito del presente trabajo. [18]

4

SISTEMA DE CONTEO DE FOTONES BIDI- MENSIONAL HAMAMATSU

4.1 GENERALIDADES

La cámara PIAS (Photon Counting Image Acquisition System) de HAMAMATSU es un préstamo del National Okiyama Observatory de Japón para el IAUNAM. Es un sistema cuentafotones bidimensional, un fotocátodo S-20 seguido de un arreglo de placas microcanales y un ánodo resistivo. Una electrónica de control que entrega la posición X-Y de un evento en una palabra digital de 9 bits y un par de señales que controlan el protocolo de comunicación.

En el IAUNAM se desarrolló la interfase electrónica de lectura para adquirir las posiciones de los eventos sobre el detector usando una microcomputadora compatible con IBM AT y un programa básico de adquisición y despliegue a partir del cual es posible que el sistema realice cualquier tipo de adquisición, ya sea integrando una imagen o para almacenar cada evento individualmente. La imagen es mostrada en modo gráfico 1024x768x256 en una subventana de 512x512 píxeles y por lo tanto su intervalo dinámico es de 256 cuentas por píxel.

Un sistema de enfriamiento para disminuir la tasa de ruido del detector basado en un refrigerador de estado sólido tipo Peltier, manteniendo la temperatura en la región cercana al fotocátodo se mantiene a menos de 0 °C cuando se ha operado la unidad durante 1 hora con una temperatura ambiente de 20 °C. El circuito de enfriamiento es cerrado contando con un intercambiador de calor y una tasa de flujo de agua de 1 a 3 L/min, ya que la temperatura del líquido se eleva rápidamente y el sistema desactiva la celda Peltier en caso de que eso suceda, además emite un sonido de alerta y la lámpara de encendido se apaga.

Aunque es un sistema lento y de resolución mediana comparado con sistemas como el MEPSICRON, provee de un sistema sencillo, robusto y manejable para efectuar pruebas

durante el desarrollo de sistemas adaptivos en el laboratorio de óptica y pruebas de manejo de la cámara sobre otras plataformas en el Departamento de Instrumentación del IAUNAM.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LA CÁMARA

4.2.1 El tubo

El tubo es un detector bidimensional de conteo de fotones modelo N1831-01 con fotocátodo alcalino S-20 a la entrada, una apertura efectiva de 15 mm y seguido de un juego de placas microcanales con una ganancia de 10^6 , la ganancia total del arreglo es de 10^8 . La resolución espacial es de 10 líneas/mm y la distorsión en la posición menor del 3%. Al final del arreglo se encuentra un ánodo resistivo descrito en el manual original como un PSD (Position Sensitive Device). El detector, *figura 24*, se encuentra montado en un cabezal donde además residen la unidad de enfriamiento que consta de una celda Peltier y un intercambiador de calor que usa agua como refrigerante.

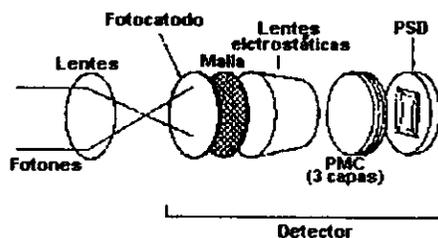


Fig. 24 Detector bidimensional de conteo de fotones

4.2.2 Electrónica de control

La electrónica de control está conformada por 4 partes: el analizador de posición, el sistema de enfriamiento, el contador de eventos y la fuente de alto voltaje. Excepto el segundo, todo está contenido en dos módulos, uno de los cuales provee la energía necesaria para la fuente de alto voltaje y la celda de enfriamiento y el otro contiene la electrónica de lectura.

4.2.2.1 El analizador de posición.

En la figura 25 se muestra el diagrama a bloques del Analizador de Posición de Eventos (APE). Las señales de salida del detector son amplificadas y preparadas para calcular la posición de los eventos incidentes.

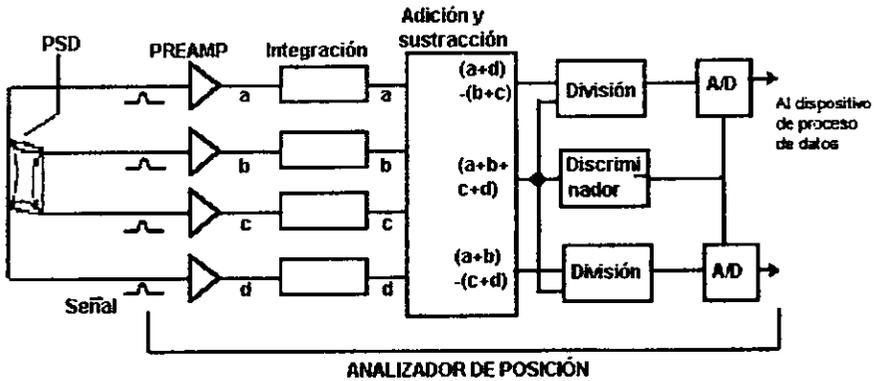


Fig. 25 Analizador de Posición de Eventos

La ganancia del sistema de preamplificación es de 32 dB. Nótese que los cálculos necesarios para obtener las coordenadas de un evento son efectuados analógicamente y no es sino al final cuando se hace la conversión analógico digital a 9 bits. Esto puede obedecer a la baja velocidad del detector y a que solo son calculadas 512 posiciones para cada coordenada, por lo que es necesaria una electrónica con una relación S/R de tan sólo 54 dB y una tasa de conteo máxima de 10,000 cuentas/s en el mejor de los casos. Por esa razón, la rapidez y linealidad de los componentes está limitada a un tiempo de conversión 8.5 μ s y el tiempo de cálculo total de 10 μ s.

El APE además entrega un par de señales analógicas correspondientes a cada coordenada con una amplitud de ± 5 V / 2 k Ω y un pulso de evento TTL con una duración de 3 μ s. Esta señal puede ser usada para monitorear el detector en un osciloscopio.

4.2.2.2 Sistema de enfriamiento.

El detector requiere para su óptima operación mantener una temperatura menor a los 50 °C. Por lo tanto, es necesario mantener un flujo de agua de 1 a 3 L/min a través de los conductores posteriores del cabezal y, así disipe el calor generado por la cara caliente de la celda Peltier. El sistema desactiva automáticamente la celda Peltier en caso de que la temperatura del líquido se eleve, emitiendo un sonido de alerta y apagando la lámpara de encendido. Por lo que es importante contar con un intercambiador de calor, debido a que el circuito de enfriamiento implementado es cerrado, elevando rápidamente la temperatura del líquido.

El actual sistema de enfriamiento está compuesto por el sistema de control electrónico y el de control mecánico.

4.2.2.2.1 Sistema de control electrónico

Básicamente es el control de velocidad de un motor con un intervalo de voltaje de 4.5 a 25 V, a una corriente de 1.5 A.

El voltaje de línea alterna llega a un transformador de 1.7 A y 20 V de salida, como acoplamiento entre la línea alterna y el circuito de control de velocidad con su voltaje ya direccionado se emplea un puente de diodos y un capacitor de 2000 μF , el capacitor evita las variaciones del voltaje de entrada.

El circuito de control es un circuito regulador de corriente: se controla la corriente a través de un LM324, su salida va a un par de transistores NPN en configuración Darlington (2N2222 y 2N3055). La salida del Darlington (emisor del 2N3055) va al motor evitando variaciones o alteraciones en su rotación debidas al flujo de la corriente por medio de un capacitor de 0.1 μF . La variación de la velocidad del motor desde el exterior es a través de un potenciómetro conectado a V_{cc} , tierra y a la entrada positiva (+) del LM324. (Fig. 26)

Para evitar problemas de cortos y alteraciones en el circuito se colocó el circuito completo en una caja prototipo.

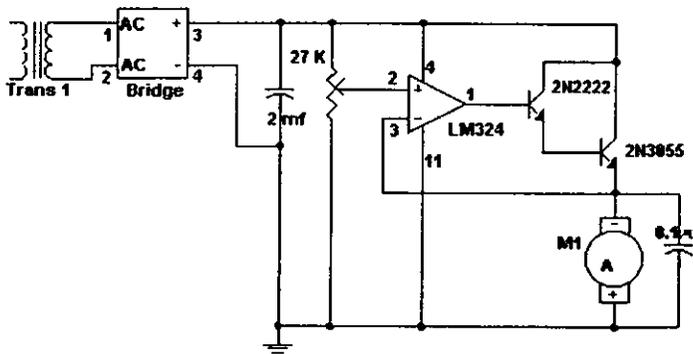


Fig. 26 Control de Velocidad

4.2.2.2.2 Sistema de control mecánico

Consiste en el control del mecanismo por el cual el flujo del líquido refrigerante fluye a través del detector de manera continua a una rapidez de 3 L/min.

El flujo del líquido en este caso es agua, fluye través de un circuito cerrado con dirección de flujo *Detector - Bomba peristáltica - Intercambiador de calor - Detector*. Es

más conveniente emplear un líquido anticongelante que soporte temperaturas hasta -15°C . (Fig. 27)

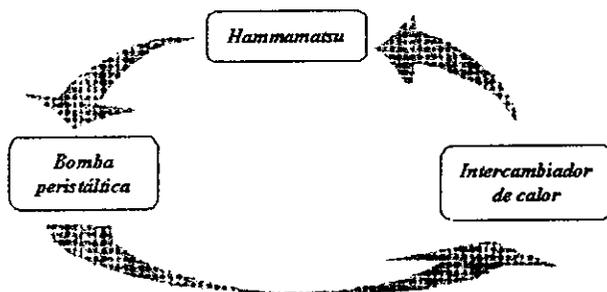


Fig. 27 Flujo del agua

Un motor hace girar una bomba peristáltica a través de un acoplamiento homociné-tico de nylon fabricado en CAFET, S.A..

Una vez que el flujo pasa a través del detector es bombeado hacia el intercambiador de calor para su rápido enfriamiento y regresa al detector. Debido a que el intercambiador de calor aumenta su temperatura se requiere de un ventilador para mantenerlo frío.

El flujo de agua a través de la bomba es por medio de una manguera de silicona, la manguera tiene que ser exclusivamente de silicona ya que la bomba requiere que tenga cierto grado de flexibilidad, esta manguera tiene que ser engrasada con grasa de vacío de mane-ra regular.

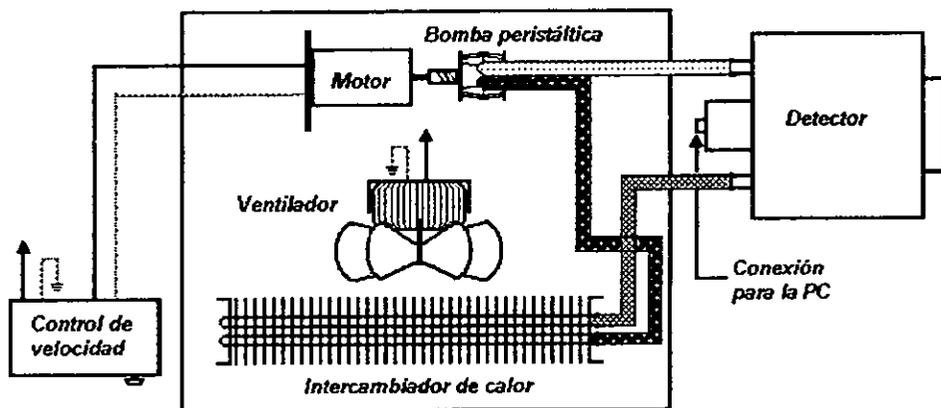


Fig. 28 Sistema de enfriamiento

4.2.2.3 Contador de eventos

El contador muestra el número de eventos que ha recibido el sistema en 2 modalidades:

- Modo entrada (INPUT): Muestra los eventos tanto válidos como dobles y el ruido (sin discriminar) que ha recibido el detector.
- Modo ventana (Window): Muestra solamente aquellos eventos que son válidos, quedan dentro de los umbrales de discriminación y son presentados a la salida digital del APE.

La selección del modo se hace en el panel frontal con el interruptor que esta cerca del visualizador.

4.2.2.4 Fuente de alto voltaje

La fuente de alto voltaje provee el potencial necesario para el fotocátodo y las placas microcanales del tubo. La salida es de 2.4 kV y el interruptor de encendido se encuentra en el panel frontal del gabinete. Cuando el número de cuentas excede las 40,000 cuentas/s, la fuente es apagada como medida de protección y se debe presionar el interruptor momentáneo HV RESET para restablecer la operación.

4.2.3 Señales de salida y control

El sistema electrónico entrega una serie de señales de datos y protocolo con las cuales se efectúa la comunicación con un dispositivo externo como una computadora. (Fig. 29)

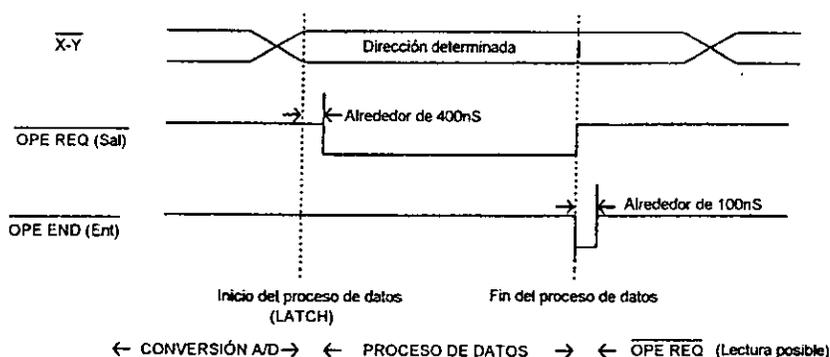


Fig. 29 Señales de salida y control

Las únicas consideraciones especiales sobre las señales son:

- La señal OPE REQ puede ser usada como CLK en un circuito de enganche (74LS374) para amarrar las direcciones.
- OPE END debe ser emitida por el sistema para poder procesar el siguiente evento, aunque las líneas de dirección pueden cambiar después de 10 μ s de haber activado OPE REQ, éste no se reactivará a menos que el sistema reciba OPE END.
- La salida es TTL a colector abierto y es necesario usar circuitos Schottky en la entrada y colector abierto en la salida de la computadora para disminuir la posibilidad de error en la transmisión.

4.2.4 Requerimientos periféricos

La cámara, como ya se mencionó, requiere de un flujo de agua de 1 a 3 L/min provisto por la bomba peristáltica y una toma de corriente C.A. de 120 V.

4.2.5 Cuidados especiales

Se deben seguir las recomendaciones básicas para fototubos y fotomultiplicadores al manejar la cámara [Capítulo 1]. Por otro lado, es importante mantener el flujo de agua disponible, ya que el cabezal se calienta rápidamente. En caso de usar un ciclo cerrado, se debe usar un intercambiador de calor.

Se debe respetar el orden de encendido para evitar el dañar los componentes del sistema:

1. Computadora
2. Fuente de poder
3. Electrónica de control
4. Alto voltaje

El orden de apagado es inverso.

4.3 INTERFASE ELECTRÓNICA (JDR)

La computadora recibe las direcciones usando el ducto interno a través de una tarjeta de interfase de propósito general JDR-16. Esta tarjeta cuenta con la electrónica de descodificación para efectuar transferencias de 8 ó 16 bits. Los diagramas de la tarjeta así como los programas de los PAL's se encuentran en el apéndice 1.

4.4 INTERFASE ELECTRÓNICA (LEIA)

La interfase complementaria es bastante sencilla, ya que la tasa de conteo es baja y por lo tanto el acoplamiento temporal entre los sistemas puede quedar a cargo del software. Básicamente consta de una sección de manejo (circuitos Schottky y colector abierto), una sección de recepción de datos (74LS374) y otra sección muy pequeña de control de señales.

En la figura 30 se muestra el diagrama electrónico de la interfase. Toda la tecnología es TTL. El prefijo b en las señales como X0 (bX0), y Xprep (bXPrep) indican que la señal proviene del buffer correspondiente (74LS314) ya que las salidas de la cámara son a colector abierto.

El software chequea constantemente el estado OPE REQ y cuando la señal cambia, procede a leer los puertos donde se encuentra la posición X-Y del evento, posteriormente esta posición puede ser usada como argumento en la cosuma o puede ser almacenada para tener un registro lineal de la observación asignándole la marca de tiempo correspondiente.

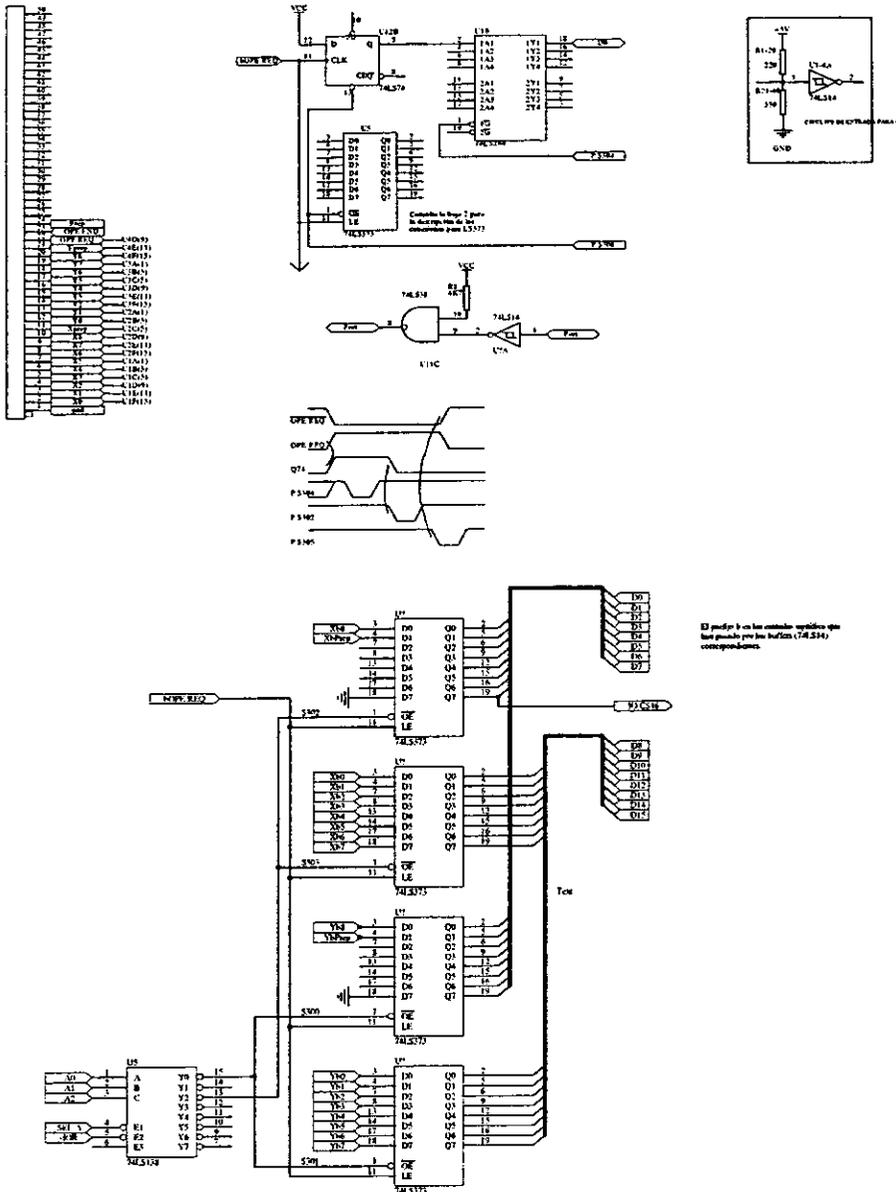


Fig. 30 Diagrama electrónico de la interfase.


```

Dummy:=Port[pOPEEND];      { Envía OPE END a HAMAMATSU }
Repeat
  While ((Port[pOPEREQ] and $01) <> 1) and (Elapsed<20000) Do
    Inc(Elapsed);          { Incrementa ELAPSED y aborta si excede un límite}
    If Elapsed>=10000 Then
      Elapsed:=-1
    Else
      Elapsed:=0;          { ...o lo limpia en caso contrario}
      X:=PortW[pX];        { Lee X }
      Y:=PortW[pY];        { Lee Y }
      Dummy:=Port[pOPEEND]; { Envía OPE END a HAMAMATSU }
      X:=Swap(X) and $01FF;
      Y:=Swap(Y) and $01FF;
      Cosuma(X,Y);
  Until KeyPressed or (Elapsed<0); { Hasta que el usuario aborte o se exceda ELAPSED}
  If Elapsed<0 Then
    RaiseException('La cámara está apagada o desconectada. Verifícala.');
```

```

  While KeyPressed Do
    ReadKey;
End;
```

Listado 1.

Como se puede ver, el control es bastante sencillo, las constantes pX y pY no son más que las direcciones de los puertos donde se lee el valor de cada coordenada. Al iniciar la adquisición, se lee el puerto pX y $pOPEEND$ para asegurar que las señales de control sean inicializadas correctamente. La variable Dummy es necesaria de esta manera para que genere un pulso que el sistema requiere para comenzar a adquirir datos. El ciclo

```

While ((Port[pOPEREQ] and $01) <> 1) and (Elapsed<20000) Do
  Inc(Elapsed);
```

simplemente espera que llegue algún evento (que es detectado en $pOPEREQ$) o que el contador *Elapsed* indique que no hay señal presente (ni siquiera de ruido), lo que genera una excepción. El procedimiento *RaiseException* no existe en Turbo Pascal, sólo se muestra para indicar donde se maneja el error. El ciclo de lectura es repetido hasta que el usuario presione alguna tecla o hasta que se detecte que la cámara no está encendida. El procedimiento *Cosuma(X,Y)* incrementa el valor de el píxel (X,Y) sobre la imagen.

Con 9 bits, es posible especificar 512 localidades por eje, por lo que la imagen contiene al menos 512×512 píxeles. Si la cosuma se efectúa sobre 8 bits (256 cuentas, valor suficiente, ya que son necesarios varios minutos para saturar la imagen), la imagen ocupa 256 kbytes en memoria. Dado que no es posible reservar bloques mayores de 64 kbytes en MS-Dos, hay tres alternativas:

1. Usar un *DOS Extender* para manejar la matriz en la memoria extendida.
2. Definir una matriz de 512 apuntadores que reservan cada uno 512 localidades para cada píxel. El manejo es bastante eficiente y sencillo, aunque carece de despliegue en tiempo real.
3. Utilizar la memoria de una tarjeta gráfica SVGA en modo $1024 \times 768 \times 256$ como almacén para la matriz.

En el presente trabajo se describe el funcionamiento con el tercer esquema, ya que no contamos en estos momentos con un *DOS Extender* y el segundo esquema no muestra la imagen en tiempo real.

Utilizar la memoria gráfica tiene su contraparte : El acceso es lento ya que depende fuertemente de la implementación. Al menos, Borland ha sustituido las llamadas a BIOS por una serie de rutinas más eficientes. Por otro lado, contamos con los archivos BGI (Borland Graphics Interface) para manejar casi cualquier modo gráfico en tarjetas SVGA. De esta manera, el procedimiento *Cosuma(X,Y)*; es sustituido por

```
PutPixel (X, Y, GetPixel (X, Y) +1) ;
```

previa reasignación de la tabla de color.

En el listado 2 se muestra la unidad de procedimientos para el manejo de la cámara.

```
Unit Data;

Interface

Uses CRT, Dos, Graph, Friends;

Procedure DataInit;

Procedure DataAcquire;

Implementation

{$I SVGA256.INC}

Procedure DataInit;

Var   ErrorCode,I,                (Código de error en gráficos)
      GraphDriver,                (Variables de inicialización gráfica)
      GraphMode   : Integer;
      AutoDetectPointer : pointer; {Apuntador de autodetección en gráficos}
      Palette     : DacPalette256; {Paleta de color}

Begin
  DirectVideo := False;           { apaga accesos directos a video }
                                   { instala el driver SVGA256 }
  GraphDriver := InstallUserDriver('Svga256',AutoDetectPointer);
  GraphMode := SVGA800x600x256;
  InitGraph(GraphDriver, GraphMode, ''); { torna a modo gráfico }
  ErrorCode := GraphResult;         { error?: trueno }
  if ErrorCode <> grOK then
  begin
    Writeln('Error en graficos: ', GraphErrorMsg(ErrorCode));
    Halt(1);
  end;
  For I:=0 to $1F Do                (Define la paleta de color a usar)
  Begin
    Palette[I][0]:=2*I;           Palette[I][1]:=0;           Palette[I][2]:=0;
    Palette[I+32][0]:=63;         Palette[I+32][1]:=2*I;         Palette[I+32][2]:=0;
    Palette[I+64][0]:=63-2*I;     Palette[I+64][1]:=63;         Palette[I+64][2]:=0;
    Palette[I+96][0]:=0;          Palette[I+96][1]:=63;         Palette[I+96][2]:=2*I;
    Palette[I+128][0]:=0;         Palette[I+128][1]:=63-2*I;    Palette[I+128][2]:=63;
    Palette[I+160][0]:=2*I;       Palette[I+160][1]:=0;        Palette[I+160][2]:=63;
    Palette[I+192][0]:=63;        Palette[I+192][1]:=2*I;      Palette[I+192][2]:=63;
  End;
  For I:=224 to 255 Do
  Begin
    Palette[I][0]:=63;
```

```

    Palette[1][1]:=63;
    Palette[1][2]:=63;
End;

SetVGAPalette256(Palette);           (...la cambia)

SetColor(255);                       (recuadro de la imagen)
Line(512,0,512,512);
Line(0,512,512,512);

For I:=0 to $FF Do                   (Paleta de color en la pantalla)
  Begin
    SetColor(I);
    Line(I+50,520,I+50,540);
  End;

  SetColor($FF);
  Rectangle(49,520,306,540);         (recuadro de la paleta)
End;

Procedure DataAcquire;
Const pX      = $300;                ( Definición de los puertos de status y lectura )
      pY      = $302;                (coordenada X)
      pOPEREQ = $304;                (coordenada Y)
      pPOPEEND = $305;              (Requisición de datos (leer))
                                       (fin de proceso (leer))

Var   X,Y      : Word;               (Coordenadas)
      Elapsed  : Integer;            (ciclos transcurridos antes de la ler lectura)
      Dummy    : Byte;

Begin
  Elapsed:=0;
  Dummy:=Port[pX];                   ( Limpia bandera de status (necesario) )
  Dummy:=Port[pPOPEEND];              ( Envía OPE END a HAMAMATSU )
  Repeat
    While ((Port[pOPEREQ] and $01) <> 1) and (Elapsed<20000) Do
      Inc(Elapsed);                  ( Incrementa ELAPSED y aborta si excede un limite)
    If Elapsed>=10000 Then
      Elapsed:=-1
    Else
      Elapsed:=0;                    ( ...o lo limpia en caso contrario)
      X:=PortW[pX];                   ( Lee X )
      Y:=PortW[pY];                   ( Lee Y )
      Dummy:=Port[pPOPEEND];          ( Envía OPE END a HAMAMATSU )
      X:=Swap(X) and $01FF;
      Y:=Swap(Y) and $01FF;
      PutPixel(X,Y,GetPixel(X,Y)+1);
  Until KeyPressed or (Elapsed<0); { Hasta que el usuario aborte o se exceda ELAPSED)
  If Elapsed<0 Then
    PutMessage('La cámara está apagada o desconectada. Verificala. ');
  While KeyPressed Do
    ReadKey;
End;
End.

```

Listado 2.

El programa es mostrado en el listado 3.

```

(Programa de adquisición y
control de la cámara Hamamatsu)
Program Control_Hamamatsu;

Uses CRT, Dos, Graph, Data, FileMng, Friends;

Var Finish : Boolean;
    Car : Char;

Procedure Init;

Begin
    Finish:=False;
    DataInit;      (Inicializa el manejador de datos)
End;

Procedure CommandLabels;
Begin (etiquetas y mensajes al procesar comandos)
    SetFillStyle(SolidFill,Black);
    Bar(520,0,799,150);
    SetColor(255);
    SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,6);
    OutTextXY(520,0,'CAMARA HAMAMATSU');
    OutTextXY(520,15,'Prueba de graficado');
    OutTextXY(520,30,'Fernando Angeles Uribe');

    OutTextXY(520, 65,'<ESC> Para salir');
    OutTextXY(520, 80,'S Para guardar la imagen');
    OutTextXY(520, 95,'C Para cargar una imagen');
    OutTextXY(520,110,'A Para adquirir datos');
End;

Procedure AcquireLabels;
Begin (etiquetas y mensajes al adquirir datos)
    SetFillStyle(SolidFill,Black);
    Bar(520,0,799,150);
    SetColor(255);
    SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,6);
    OutTextXY(520,0,'CAMARA HAMAMATSU');
    OutTextXY(520,15,'Prueba de graficado');
    OutTextXY(520,30,'Fernando Angeles Uribe');
    OutTextXY(520,40,'Donají X. Cruz López');

    OutTextXY(520, 65,'Adquiriendo');
    OutTextXY(520, 80,'<ESC> Para detener');
End;

Procedure ProcessCommand; (Procesador de comandos)
Begin
    Car:=UpCase(Car);
    Case Car of
        'S' : FileSave;      (Guarda los datos en archivo)
        'C' : FileRead;     (Carga los datos de un archivo)
        'A' : Begin
                    AcquireLabels;
                    DataAcquire;
                    CommandLabels;
                End;
        ' ' : PutMessage('');
    #S1B: Finish:=True;     (enciende bandera de terminado)
    End;
End;

Begin
    Init;      (Inicializa)

```

```
CommandLabels;      (Presenta mensajes de comando)
Repeat
  Car:=ReadKey;
  ProcessCommand;   (Procesa el comando)
Until Finish;      (hasta fin de sesión)
RestoreCRTMode;    (pantalla en modo previo)
End.
```

Listado 3

Las unidades Friends y FileMng referenciadas en el programa no son más que utilerías muy sencillas para los procedimientos Ping, PutMessage(), FileSace y FileRead que no creo necesario incluir en los listados.

5

DETERMINACIÓN DE LA ABERRACIÓN DE DISTORSIÓN GEOMÉTRICA

Una vez que se han dado los conceptos fundamentales en los que se basa el presente trabajo y, se ha descrito la construcción interna, su implementación, así como el modo de operación del sistema detector Hamamatsu, se prosigue a determinar la aberración de distorsión geométrica del detector Hamamatsu. En el presente capítulo se hace una descripción detallada del método empleado, los requerimientos instrumentales, el tipo de análisis aplicado así como de los resultados obtenidos con su respectivo análisis.

5.1 MÉTODOS PROPUESTOS

Basándome en el tipo y estructura del detector HAMAMATSU y en el objetivo del presente trabajo analicé los siguientes métodos:

5.1.1 Rejilla en el fotocátodo

Se coloca una rejilla de Ronchi en la ventana del detector, iluminándola uniformemente. La rejilla es un patrón de líneas de 1 mm. de ancho. Se adquiere la imagen. Se calcula la correlación cruzada entre la imagen ideal del patrón y la imagen real adquirida. Se determina el valor de las aberraciones de las diversas fuentes que aparte del detector influyen en el resultado obtenido, para así poder determinar la aberración producida únicamente por el detector. Finalmente se obtiene la matriz de corrección.

El problema que presenta este método es de índole instrumental, la distancia entre la ventana del detector y el fotocátodo es considerable ocasionando que en la imagen obte-

nida no se aprecie la distorsión geométrica con un intervalo de error aceptable. Otra opción es en lugar de colocar el patrón de líneas en la ventana del detector es proyectarlo sobre el fotocátodo, sin embargo, el sistema de proyección introduce su propia distorsión.

5.1.2 Patrón a Distancia

El principio empleado para determinar la distorsión del detector es básicamente la misma, su única variación es: colocar un patrón de líneas a la distancia más alejada posible del detector. Las diversas fuentes de aberraciones del sistema se presentan en el capítulo 2.

El método más adecuado para determinar la aberración de distorsión geométrica es al que le he denominado Patrón a Distancia. En la sección 5.2 se da la explicación más detallada de la aplicación de este método.

En el presente trabajo una de las señales de respuesta es generada de manera teórica, es decir, se genera la imagen que el detector debería entregar si no presentase esta aberración. La otra señal de respuesta es llamada imagen real es decir, es la imagen obtenida a través de la adquisición del patrón de líneas por el detector.

5.2 JUSTIFICACIÓN DEL PRINCIPIO

Determinar la aberración de distorsión geométrica empleando el método Patrón a Distancia se basa en: Calcular la autocorrelación de la imagen ideal, la correlación cruzada de la imagen ideal con la imagen real. Obtener el coeficiente de correlación el cual nos va a dar la base para obtener la matriz de corrección. La matriz de distorsión se obtiene al comparar la autocorrelación de la imagen ideal con la correlación cruzada de la imagen real, a través de la obtención de los valores máximos y mínimos de la correlación cruzada.

Los fundamentos teóricos en los que se basa el método patrón a distancia son:

La correlación cruzada con $f(x,y)$ y $g(x,y)$ las señales de respuesta del sistema es expresada a través de la ecuación: $f_c(x,y) \circ g_c(x,y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_c^*(m,n) g_c(x+m, y+n)$ en el dominio espacial. Su cálculo se facilita si cambiamos al dominio de las frecuencias, el teorema de correlación permite esta relación. [Capítulo 3]

$$f(x,y) \circ g(x,y) \Leftrightarrow F^*(u,v)G(u,v)$$

Por lo tanto considerando a $f(x,y)$ la expresión de la imagen ideal y $g(x,y)$ la expresión de la imagen real, la correlación cruzada dada en función del teorema de correlación está dada por la expresión:

$$f(x, y) \circ g(x, y) = F^{-1} [F^*(u, v)G(u, v)] \text{ con}$$

$$F^*(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp[j2\pi(ux/M + vy/N)]$$

$$G(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x, y) \exp[-j2\pi(ux/M + vy/N)]$$

$$F^{-1}(x, y) = f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \exp[j2\pi(ux/M + vy/N)]$$

Para el caso de autocorrelación, las funciones $f(x,y)$ y $g(x,y)$ son iguales, es decir $f(x,y)=g(x,y)$.

De las fórmulas anteriores, se puede observar que el valor máximo de la correlación cruzada se da cuando las dos imágenes encuentran el mayor parecido, en el caso de la autocorrelación de una señal nos da el valor máximo cuando la señal se encuentra completamente sobrepuesta sobre sí misma. En cambio, si $g(x,y)$ es una señal ligeramente desfasada con respecto a $f(x,y)$, el valor máximo de la correlación cruzada también está ligeramente desfasado y la diferencia en posición de los valores máximos es el valor del desfazamiento. Por lo tanto por medio de la comparación de la autocorrelación y correlación cruzada se obtiene el valor de la distorsión. La distorsión expresada porcentualmente se obtiene al calcular $\text{distorsión}(\%) = \frac{dx}{x} \times 100$, con dx el desfazamiento. El cálculo para la distorsión en el eje y es análogo al empleado para el eje x .

Al obtener la correlación cruzada de la imagen ideal con la imagen real, se obtiene el valor del coeficiente de correlación para cada posición de pixel (x,y) , por lo tanto, la matriz de corrección es la matriz formada por el inverso de cada uno de los coeficientes de correlación para cada pixel. Así la imagen adquirida es multiplicada por la matriz de corrección de cada dirección y se obtiene la imagen corregida

5.3 PATRÓN A INFINITO E INSTRUMENTAL REQUERIDO.

Una vez que se ha definido el método a aplicar, se presenta a continuación el instrumental que se requiere para su implementación.

5.3.1 Requerimientos instrumentales:

1. Lente Nikon de 200 mm fija, para obtener la menor distorsión geométrica ocasionada por la lente . La lente es un requerimiento intrínseco del detector para la adquisición de la imagen. (Fig. 24)
2. Filtro neutro, evita la rápida saturación del detector.

3. Patrón de líneas : Patrón de 83x92 cm. con líneas de 83 x 2.5 cm en color negro y un espaciado de 83x2.5 cm en color blanco. (Fig. 32)
4. Led rojo, para producir una iluminación uniforme sobre el patrón de líneas, colocado a una distancia de 1.5 mts. del patrón.
5. Detector Hamamatsu.
6. Interfase de Lectura PC Compatible-PIAS (Hamamtsu).

La lente Nikon fue un préstamo del National Okiyama Observatory de Japón para el IAU-NAM.

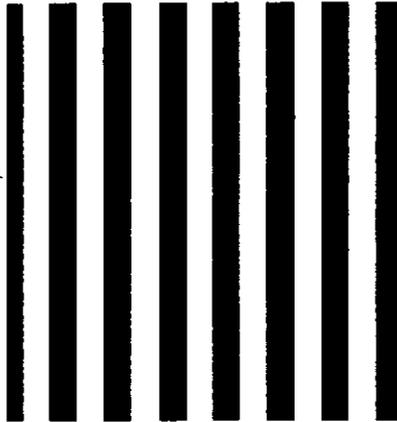


Fig. 32 Patrón de líneas, original.

5.4 SISTEMA COMPLETO

La disposición del sistema completo es representado en la figura 33.

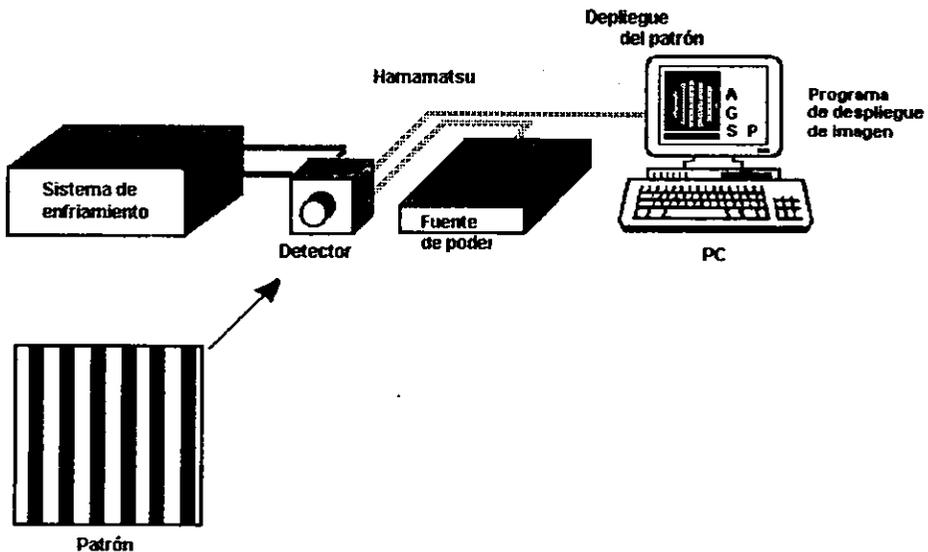


Fig. 33 Sistema completo

5.5 METODOLOGÍA, ANÁLISIS Y RESULTADOS.

5.5.1 Metodología general.

Se requiere dividir la metodología en:

- Determinar los componentes del sistema que contribuyen a la distorsión de la imagen adquirida.
- Determinar la contribución de los componentes del sistema a la distorsión del sistema completo.
- Determinar la distorsión del sistema completo.
- Determinar la distorsión del detector.

Salvo el primer punto, los demás se van a ir detallando a lo largo del capítulo.

5.5.1.1 Componentes que contribuyen a la distorsión geométrica de la imagen adquirida.

De las aberraciones mencionadas en el capítulo 2, los elementos del sistema que contribuyen a la distorsión de la imagen son:

- *La lente:* Por ser una componente óptica presenta diversas aberraciones entre las que se encuentra la distorsión, por lo que afecta de manera directa a la imagen adquirida. [Capítulo 2, Aberraciones ópticas, distorsión].
- *El detector:* Presenta aberraciones por ruido y linealidad electrónica. Ambas han sido minimizadas, es decir, la electrónica y el sistema de enfriamiento implementados permiten asegurar que el valor con el que contribuyen a la distorsión de la imagen adquirida es el mínimo permisible, debido a que la implementación se basa en los mejores componentes tecnológicos existentes. Por lo tanto, si son una fuente de distorsión son atribuidos al funcionamiento del detector. Los componentes empleados para su implementación se encuentran descritos en el capítulo 4.

Por lo tanto se puede afirmar que la distorsión geométrica de una imagen adquirida a través del detector es la distorsión producida por la lente Nikon y por el detector mismo. A continuación se presenta la metodología, resultados y análisis de la determinación de la aberración producida por la lente Nikon.

5.5.2 Distorsión de la lente.

Para determinar la distorsión producida por la lente, se requiere analizar las imágenes que produce y determinar si la variación en micras de una línea de la imagen es apreciable a la sensibilidad en micras del detector. La sensibilidad del detector es de 20 micras. Tanto la sensibilidad del detector como la variación en micras de una línea se pueden expresar porcentualmente.

5.5.2.1 Metodología para determinar la distorsión de la lente.

Se adquieren transparencias del patrón de interlineado, a la misma distancia a la que se coloca el patrón y el detector, empleando el sistema cámara fotográfica + lente con iluminación uniforme sobre el patrón. Se mide la variación en el ancho de las líneas, y se compara con la mínima variación perceptible por el detector.

5.5.2.2 Resultados y análisis de la distorsión de la lente.

La película empleada fue marca Kodak de alta sensibilidad, ASA 64. Se utilizó una cámara que no contribuye a la distorsión producida por la lente en la transparencia y la iluminación uniforme fue producida con una lámpara de 100 watts., colocada a una distancia de 5 m. del patrón.

Para determinar si la distorsión en la lente contribuye a la distorsión producida por el detector, se utilizó un microdensitómetro con sensibilidad de 0.1 micras.

Se midieron el ancho y espacio de las líneas con una variación en la altura de 10 micras, obteniendo así la máxima deformación de las líneas. La desviación máxima con el patrón en dirección vertical es de 9.8 micras y en dirección horizontal es de 7.7 micras. Por lo tanto la distorsión en ambas direcciones se calcula a través de la fórmula (2.2.1 *Aberraciones monocromáticas-Distorsión*):

$$\text{distorsión}(\%) = \frac{dx}{x} \times 100$$

$$\text{Distorsión horizontal: } \frac{7.7 \times 10^{-3} \text{ mm}}{17.5 \text{ mm}} \times 100 = 0.044\% , \text{ con signo positivo.}$$

$$\text{Distorsión vertical: } \frac{9.8 \times 10^{-3} \text{ mm}}{17.5 \text{ mm}} \times 100 = 0.056\% , \text{ con signo positivo.}$$

Independientemente de lo anterior la aberración de distorsión geométrica de la lente NO debe ser perceptible al detector, porque las lecturas con el microdensitómetro fueron menores a 20 micras que es la resolución del detector. Los resultados numéricos se encuentran en el Apéndice 2.

5.5.3 Distorsión del sistema completo.

Para su determinación se emplea el sistema completo mostrado en la figura 33.

5.5.3.1 Metodología para determinar la distorsión del sistema completo.

- Determinar la distancia de enfoque del sistema.
- Adquirir imágenes del patrón de líneas en ambas orientaciones.
- Obtener la correlación cruzada de las imágenes ideal con la imagen adquirida.
- Obtener la aberración de distorsión geométrica del sistema.

5.5.3.1.1 Distancia de enfoque del sistema.

Con la ayuda de un microscopio desplazable, se determinó que la distancia entre la ventana del detector y el fotocátodo del tubo es de 5 cm. Esta distancia se determinó para saber si la graduación de enfoque del objetivo Nikon de 200 mm. es confiable. La distancia total es la distancia ventana del detector al fotocátodo más la distancia de la montura a la ventana. Esta distancia total es mayor a la distancia montura de los objetivos a la película en una cámara normal de 35 mm. (45 mm.). Por lo tanto se tuvo que determinar experimentalmente la distancia óptima de enfoque, sin importar la graduación de la lente. La distancia de enfoque entre el patrón de líneas y el detector se determinó a 495 cm.

5.5.3.1.2 Características específicas para la adquisición y procesamiento de las imágenes.

- *Iluminación.*- Para poder determinar la distancia de enfoque, así como para la adquisición de la imágenes se requirió aplicar una iluminación uniforme a través de un led rojo, colocado a una distancia de 1.5 mts. del patrón de líneas.
- *Tiempo de adquisición.*- Debido a que el detector sin filtro presenta un tiempo de saturación corto (≈ 4 s) el tiempo de adquisición se convierte en un punto importante. Para obtener una mejor imagen se le coloca un filtro llegando a ampliar el tiempo de adquisición a 45 minutos por imagen.
- *Número de imágenes adquiridas.*- Se adquirieron 5 imágenes por cada orientación.
- *Preprocesamiento de la imagen.*- Debido a que cada imagen presenta bajo contraste a pesar de incrementar el tiempo de adquisición, fue necesario cosumarlas empleando el programa Cosuma, detallado en el apéndice 3.

Cosuma entrega una imagen con extensión *.img por lo que para poder realizar una lectura posterior de la imagen se requirió convertir la imagen a extensión *.tiff utilizando el programa Convertir,(conv).[Apéndice 3]

A pesar de la operación de cosuma aplicada a las imágenes, la imagen final sigue presentando bajo contraste por lo que fue necesario aplicarle una ecualización automática únicamente. Aplicarle cualquier otro tratamiento de imagen implicaba pérdida considerable en la información de los píxeles sobre la aberración que tiene por finalidad el presente trabajo. [Capítulo 3]

La imagen final se muestra en la figura 34.

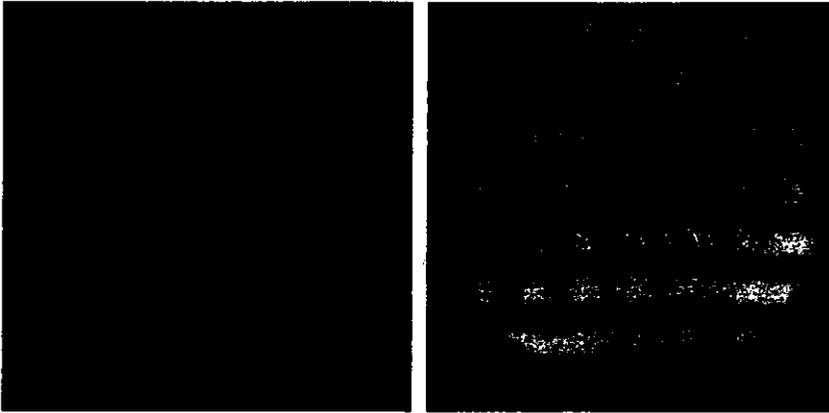


Fig. 34 Imagen adquirida e imagen adquirida con ecualización automática.

Se observa que las imágenes adquiridas no están centradas debido a un desplazamiento de la posición del centro del detector. Este desplazamiento se debe a la electrónica que se maneja para la adquisición de la imagen. [Capítulo 4]

5.5.3.1.3 La imagen ideal

Para efectuar la correlación cruzada se requiere conocer la imagen ideal, como se explicó en la sección 5.2 del presente capítulo.

La imagen ideal es generada, NO adquirida. El ancho de las líneas fue calculado en píxeles considerando:

- El diámetro del detector es de: $r = 7.5 \text{ mm}$, es decir 248 píxeles.
- El radio del área del patrón que captura el detector es de 37.5 cm a una distancia de enfoque de 5 m.
- El ancho de las líneas del patrón es de 25 mm. por lo tanto el detector las ve de un ancho de 25 píxeles.
- Las líneas son de color negro sobre fondo blanco que representan un alto contraste e iluminación uniforme, es decir con dos niveles de gris, 0 y 256.

La imagen ideal es generada en un volumen de 512x512x256 píxeles, también está delimitado por un círculo descentrado para no alterar el efecto producido por el desplazamiento del punto centro del detector que se presenta en las imágenes adquiridas.



Fig. 35 Imagen ideal en orientación vertical y horizontal.

5.5.3.2 Correlación cruzada, dirección horizontal

Una vez que se ha generado la imagen ideal, se obtiene el valor de la correlación cruzada de la imagen ideal con la imagen adquirida. A la imagen adquirida la renombraré como imagen real.

Para el cálculo de la correlación cruzada, [Capítulo 5, sección 5.2], se emplea el teorema de correlación basado en las propiedades de la transformada de Fourier. Para calcular las transformadas de Fourier se emplea la transformada rápida de Fourier, capítulo 3, por lo tanto rescribiendo la correlación cruzada en términos de la T.R.F. obtenemos:

$$f \circ g = \text{fft}^{-1} \left\{ [\text{fft}(\text{ideal})]^* \times [\text{fft}(\text{real})] \right\}$$

Para calcular la correlación cruzada para la imagen en dirección horizontal, se emplean la imagen ideal de la figura 35 y la imagen real de la figura 34.

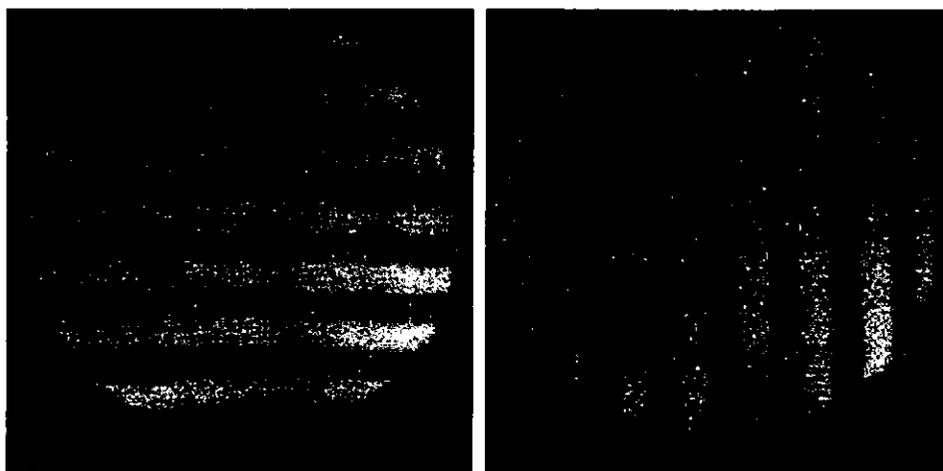


Fig. 36 Imágenes horizontal y vertical reales.

El cálculo numérico de las transformaciones directas e indirectas, la correlación cruzada y la graficación se realizó en el paquete Matlab ver. 5.2.0.. Las instrucciones generales requeridas por Matlab son:

%Correlación cruzada horizontal de la imagen ideal con la imagen real%

Ah=imread('imideal.tif');	Lee la imagen ideal.
Gh=imread('imreal.tif');	Lee la imagen real.
Zh=fft2(Ah);	Transformada rápida de Fourier (T.R.F) directa de la imagen ideal.
Hh=fft2(Gh);	T.R.F. directa de la imagen real.
Ih=conj(Zh);	Conjugada de la T.R.F. de la imagen ideal.
Kh=times(Ih,Hh);	Producto del conjugado de la T.R.F. de la imagen ideal con la T.R.F. de la imagen real, es decir la T.R.F. de la CORRELACIÓN CRUZADA , Espectro de potencia.
Lh=ifft2(Kh);	CORRELACIÓN CRUZADA.

Cada imagen real e ideal es graficada en 3 dimensiones, donde los ejes x e y representan las coordenadas de cada píxel con intervalos de $[0,512]$ cada uno. El eje z representa la intensidad de cada píxel, es decir el número de cuentas que arriban por píxel, con un intervalo dinámico de 256 cuentas por píxel.

Por ser la imagen adquirida con el patrón de interlineado en dirección horizontal, es decir paralelo al eje x , se observa la silueta de la correlación de la imagen horizontal ideal

(PHI) con la imagen horizontal real (PHR) a través de una proyección sobre el plano y-z. (Fig. 37)

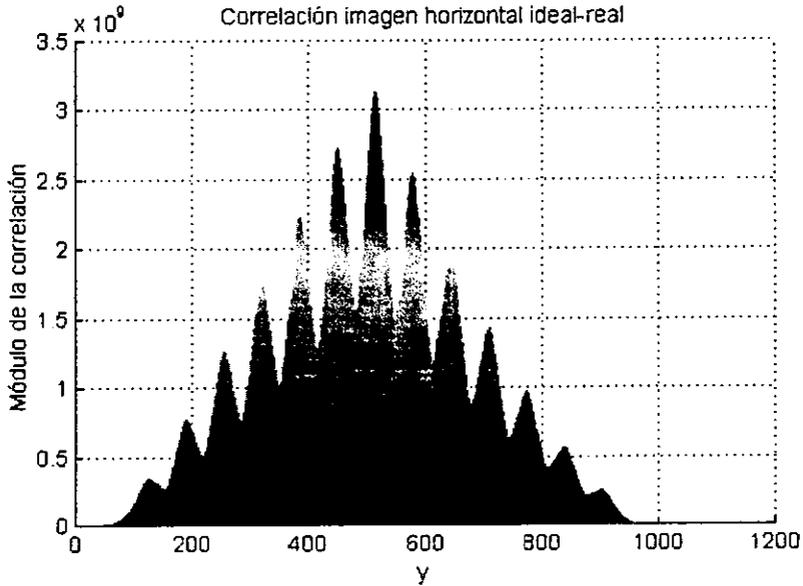


Fig. 37 Correlación cruzada PHI*PHR, proyección sobre el plano y-z, con $x=0$, de PHI*PHR

Para la autocorrelación de la imagen ideal con dirección horizontal, se enlistan en Matlab los comandos:

%Autocorrelación de la imagen ideal horizontal %

Ah=imread('imideal.tif');	lee la imagen ideal.
Bh=fft2(Ah);	transformada rápida de Fourier (T.R.F) directa de la imagen ideal.
Ch=conj(Ah);	conjugada de la T.R.F. de la imagen ideal.
Dh=times(Ch,Bh);	producto del conjugado de la T.R.F. de la imagen ideal con su T.R.F.
Eh=ifft2(Dh);	AUTOCORRELACIÓN.

La gráfica se muestra en la Figura 38.

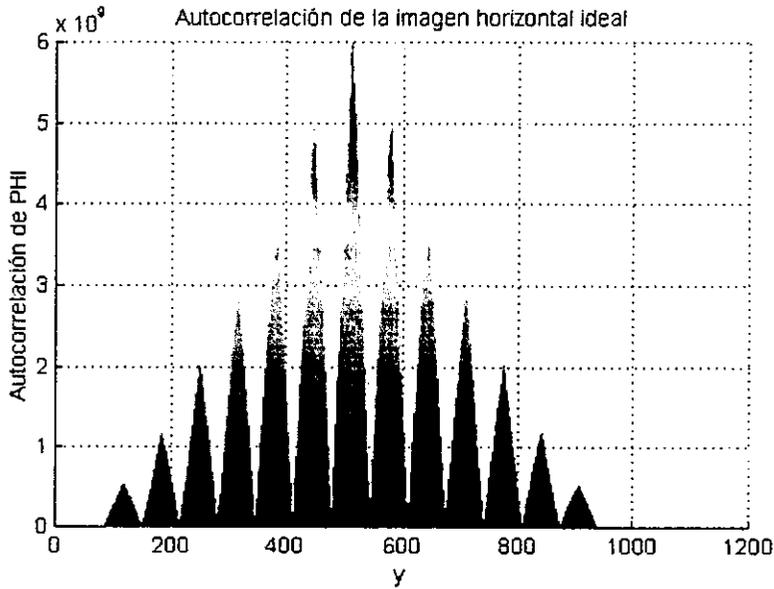


Fig. 38 Autocorrelación de PHI, proyección sobre el plano $y-z$ y $x=0$.

5.5.3.3 Distorsión del sistema Hamamatsu, orientación horizontal.

Como se mencionó en la sección 5.5.1, metodología para el cálculo de la distorsión geométrica del sistema- Hamamatsu, se debe conocer cada componente del sistema que contribuye a la distorsión que presenta la imagen adquirida. Se determinó que la única componente importante que contribuye es la lente Nikon. En la sección 5.5.2, Distorsión de la lente, se determinó que la lente no contribuye a la distorsión del sistema completo, por tener variaciones menores a las 10 micras, es decir de un 0.044%, debido a que se cuenta con un sistema de detección con un registro mínimo de variaciones de 20 micras. Por lo tanto se concluye que la distorsión del detector es la distorsión del sistema completo.

Para obtener la distorsión del sistema se obtienen los valores máximos y mínimos de la autocorrelación y de la correlación cruzada, así como su posición en el plano (x,y) . Una vez obtenidas las coordenadas son restadas obteniendo que los valores de la distorsión horizontal se encuentran en un intervalo de $\pm[2, 5]$ píxeles. Al tomar en cuenta que el ancho de las líneas de la imagen ideal es de 25 píxeles, se obtiene que la distorsión porcentual en dirección horizontal está entre el $\pm 10\%$ y el $\pm 20\%$, gráficamente la distorsión se muestra en la figura 39. Los comandos de Matlab para obtener los valores máximos de la autocorrelación y la correlación cruzada son:

%Máximos de la autocorrelación de la imagen horizontal ideal y de la correlación cruzada con la imagen real%

Ih=Max(X,Y); Regresa una matriz con la posición de los valores máximos de la autocorrelación de la imagen horizontal idea.

Ihr=Max(X,Y); Regresa una matriz con la posición de los valores máximos de la correlación cruzada de la imagen horizontal ideal con la real.

Dist=Ihr-Ih; Determina la matriz de distorsión.

La gráfica de la distorsión está dada por la figura 39.

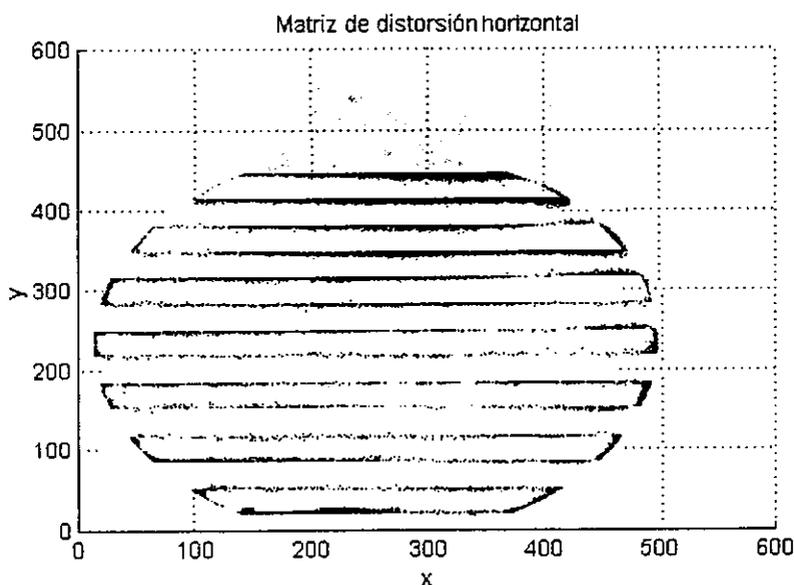


Fig. 39 Matriz de distorsión sobre el eje horizontal.

Una vez que se ha adquirido cualquier imagen, es sumamente importante corregir la distorsión que le introduce el sistema, por lo tanto se requiere conocer la matriz de corrección. Para calcular la matriz de corrección se obtienen los coeficientes de correlación de la imagen, es importante notar que calcular la matriz de corrección a través de los coeficientes permite mejorar la imagen no solamente eliminando la distorsión que le introduce el sistema detector sino que además permite eliminar el bajo contraste debido a que se calculan en base a los valores en color de cada píxel. Los coeficientes se conocen a través del comando de Matlab:

%Matriz de coeficientes de correlación de la correlación cruzada de la imagen ideal con la imagen real, orientación horizontal %

$C = \text{corrcoef}(Eh)$;

Entrega la matriz de coeficientes de correlación de la correlación cruzada de la imagen ideal con la real (Eh).

La figura 40 muestra la matriz de corrección.

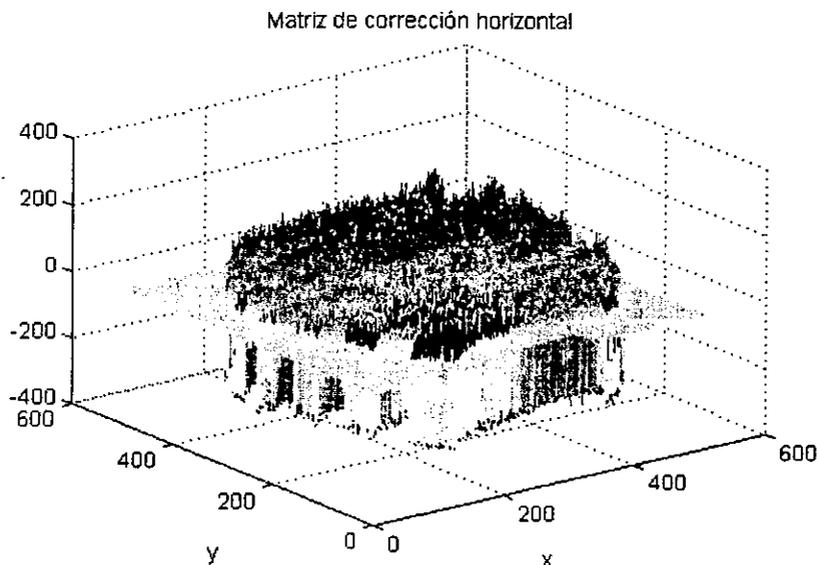


Fig. 40 Matriz de corrección horizontal.

Es importante hacer notar que esta matriz de corrección es específica para las condiciones empleadas para la adquisición de imágenes en el presente trabajo.

Nota: Solamente se presentan las gráficas de todos los cálculos debido a que, enlistar sus valores requeriría imprimir un archivo de datos con más de 2000 hojas.

5.5.3.4 Correlación cruzada, orientación vertical.

El cálculo de la correlación cruzada utilizando ahora el patrón de líneas colocado en dirección vertical así como la imagen real vertical es realizado de la misma manera que para la

dirección horizontal, sección 5.5.3.2. La única diferencia consiste en las llamadas a los archivos de las imágenes real e ideal, que ahora son sustituidas por:

%Comandos de Matlab, para calcular la correlación cruzada de imágenes ideal y real, orientación vertical %

Av=imread('idever.tif');	Lee la imagen ideal.
Gv=imread('realver.tif');	Lee la imagen real.
Zv=fft2(Av);	Transformada rápida de Fourier (T.R.F) directa de la imagen ideal.
Hv=fft2(Gv);	T.R.F. directa de la imagen real.
Iv=conj(Zv);	Conjugada de la T.R.F. de la imagen ideal.
Kv=times(Iv,Hv);	Producto del conjugado de la T.R.F. de la imagen ideal con la T.R.F. de la imagen real, es decir la T.R.F. de la CORRELACIÓN CRUZADA , Espectro de potencia.
Lv=ifft2(Kv);	CORRELACIÓN CRUZADA.

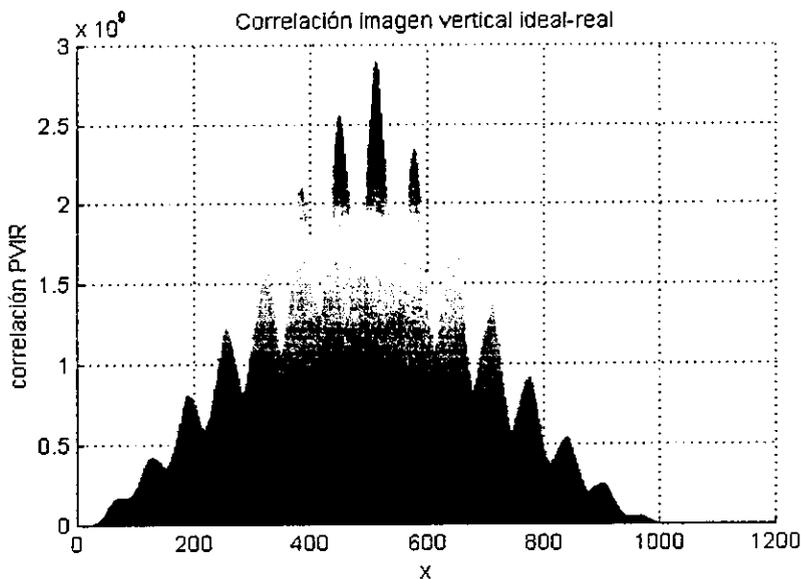


Fig. 41 Correlación de la imagen vertical ideal-real, proyección sobre el plano $xz, y=0$.

Por ser una imagen adquirida del patrón de líneas en orientación vertical se observa en la proyección sobre el plano $x - z$ la forma de la correlación, figura 41. Para la autocorrelación de la imagen ideal con dirección horizontal, se enlistan en Matlab los comandos:

%Autocorrelación de la imagen ideal vertical %

```
Av=imread('idever.tif);           lee la imagen ideal.
Bv=fft2(Av);                     transformada rápida de Fourier (T.R.F) directa de la
                                 imagen ideal.
Cv=conj(Av);                     conjugada de la T.R.F. de la imagen ideal.
Dv=times(Cv,Bv);                 producto de la conjugada de la T.R.F. de la imagen
                                 ideal con su T.R.F..
Ev=ifft2(Dv);                   AUTOCORRELACIÓN.
```

La gráfica se muestra en la *Figura 42*.

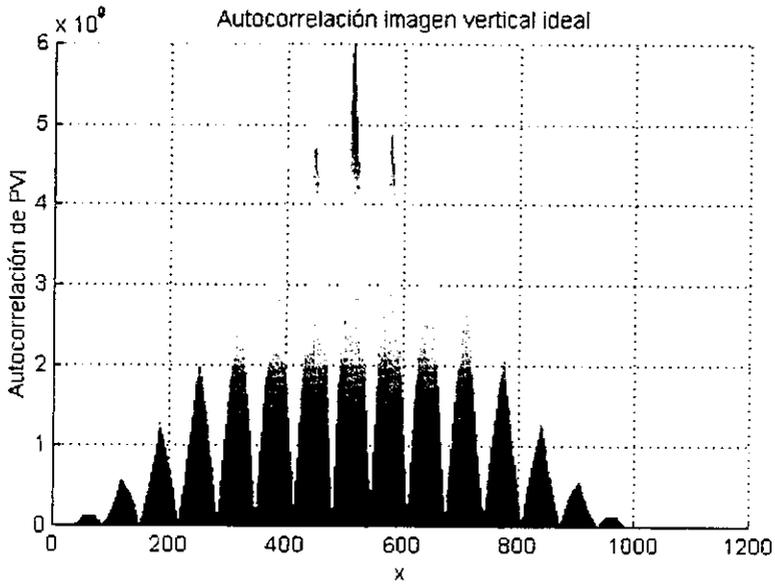


Fig. 42 Autocorrelación de PVI, proyección sobre el plano x-z con y=0.

5.5.3.5 Distorsión del sistema Hamamatsu, orientación vertical.

Como se mencionó en la sección 5.5.1, *metodología para el cálculo de la distorsión geométrica del sistema- Hamamatsu*, se debe conocer cada componente del sistema que contribuye a la distorsión que presenta la imagen adquirida. Se determinó que la única componente importante que contribuye es la lente Nikon. En la sección 5.5.2, *Distorsión de la lente*, se determinó que la lente no contribuye a la distorsión del sistema completo, por tener variaciones menores a las 10 micras, es decir, para la orientación vertical de un 0.056%, debido a que se cuenta con un sistema de detección con un registro mínimo de variaciones de 20 micras. Por lo tanto se concluye que la distorsión del detector es la distorsión del sistema completo.

Para obtener la distorsión del sistema se obtienen los valores máximos y mínimos de la autocorrelación y de la correlación cruzada, así como su posición en el plano (x,y) . Una vez obtenidas las coordenadas son restadas obteniendo que los valores de la distorsión vertical se encuentran en un intervalo de $\pm[2, 4]$ píxeles. Al tomar en cuenta que el ancho de las líneas de la imagen ideal es de 25 píxeles, se obtiene que la distorsión porcentual en dirección horizontal está entre el $\pm 10\%$ y el $\pm 20\%$, gráficamente la distorsión se muestra en la figura 43. Los comandos de Matlab para obtener los valores máximos de la autocorrelación y la correlación cruzada son:

%Máximos de la autocorrelación de la imagen vertical ideal y de la correlación cruzada con la imagen real%

Iv=Max(X,Y); Regresa una matriz con la posición de los valores máximos de la autocorrelación de la imagen vertical ideal.

Ivr=Max(X,Y); Regresa una matriz con la posición de los valores máximos de la correlación cruzada de la imagen vertical ideal con la real.

Distv=Ivr-Iv; Determina la matriz de distorsión.

La gráfica de la distorsión está dada por la figura 43.

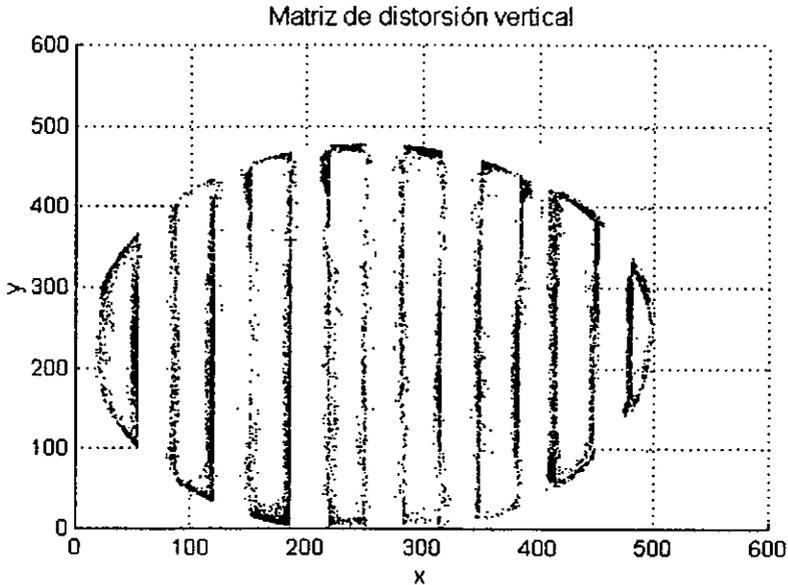


Fig. 43 Matriz de distorsión vertical

Una vez que se ha adquirido cualquier imagen, es sumamente importante corregir la distorsión que le introduce el sistema, por lo tanto se requiere conocer la matriz de corrección. Para calcular la matriz de corrección se obtienen los coeficientes de correlación de la imagen, es importante notar que calcular la matriz de corrección a través de los coeficientes permite mejorar la imagen no solamente eliminando la distorsión que le introduce el sistema detector sino que además permite eliminar el bajo contraste debido a que se calculan en base a los valores en color de cada píxel. Los coeficientes se conocen a través del comando de Matlab:

`%Matriz de coeficientes de correlación de la correlación cruzada de la imagen ideal con la imagen real, orientación vertical %`

`C=corrcoef(Ev);` Entrega la matriz de coeficientes de correlación de la correlación cruzada de la imagen ideal con la real (Ev).

La figura 44 muestra la matriz de corrección.

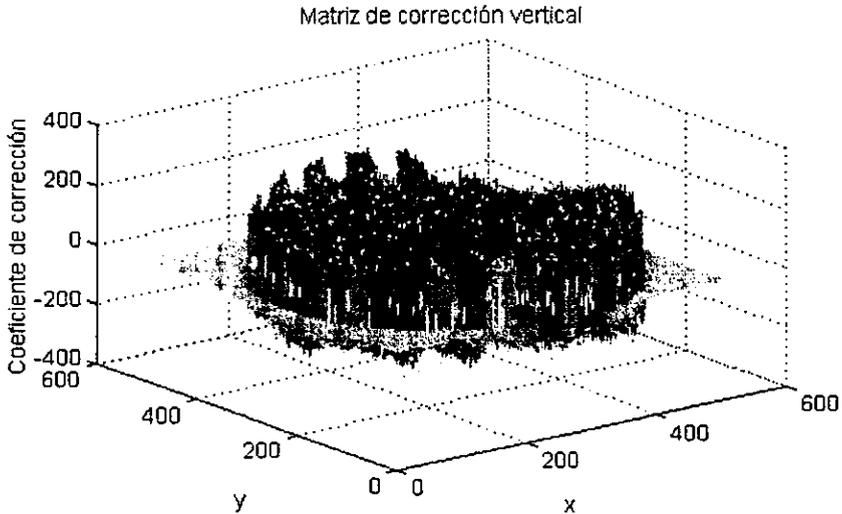


Fig. 44 Matriz de corrección vertical

Nota: Solamente se presentan las gráficas de los cálculos debido a que, enlistar sus valores requeriría imprimir un archivo de datos con más de 2000 hojas.

5.5.4 Distorsión del Detector.

Como ya se ha mencionado es la distorsión presentada para cada una de las direcciones encontradas del sistema detector+lente. Teóricamente por ser el sistema Detector + lente se debe corregir la distorsión determinada para la lente, pero esta no es considerada debido a que la distorsión de la lente en orientación horizontal es de 0.044%, y en orientación vertical es de 0.056%, que comparándolas con el valor de la distorsión del detector (entre $\pm 10\%$ y el $\pm 20\%$, para ambas orientaciones) es demasiado pequeña. **Por lo tanto la aberración de distorsión geométrica total es la aberración del Detector.**

5.5.5 Aplicación a una imagen

Es de gran importancia verificar que el método propuesto en el presente trabajo es aplicable a cualquier imagen que sea adquirida con el detector, bajo las condiciones del presente trabajo. En la presente sección se da un ejemplo de corrección de la distorsión a una imagen. La imagen a analizar es la suma de las dos imágenes reales, NO es una imagen adquirida por el detector debido a que en la actualidad no se cuenta ya con el equipo completo, por causas externas. La figura 45 muestra la suma de las imágenes.

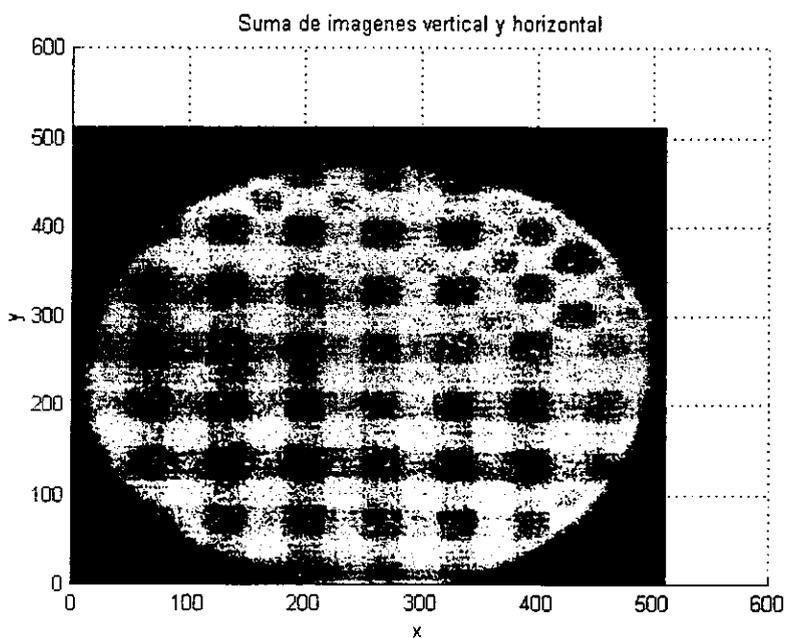


Fig. 45 Imágenes sumadas

Primero se le aplica la matriz de corrección de la imagen horizontal y posteriormente la matriz de corrección de la imagen vertical. Obteniendo la imagen de la figura 46. Los comandos en Matlab son:

```
%Corrección en dirección horizontal%
```

```
Load 'corrhor.mat';
```

Lee los datos almacenados de la matriz de corrección horizontal.

Load 'corrver.mat';	Lee los datos almacenados de la matriz de corrección vertical.
A=imread('sumaimg.tif')	Lee la suma de las imágenes reales.
B=A*corrdisth;	Multiplca la imagen A por la matriz de corrección en dirección horizontal.

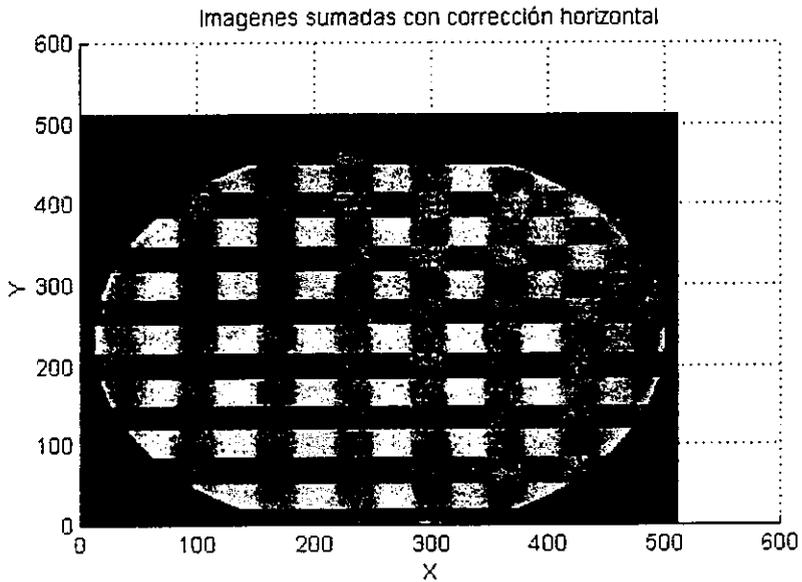


Fig. 46 Resultado de la aplicación de la matriz de corrección horizontal para la suma de las imágenes reales.

Posteriormente se le aplica la matriz de corrección vertical, obteniendo la figura 47. Los comandos aplicados en Matlab son:

%Corrección dirección vertical%	
Load 'corrver.mat';	Lee los datos almacenados de la matriz de corrección vertical.
C=B*corrdistver;	Multiplca la imagen B por la matriz de corrección en dirección horizontal. B es la imagen ya corregida en dirección horizontal
C es la imagen corregida en ambas direcciones.	

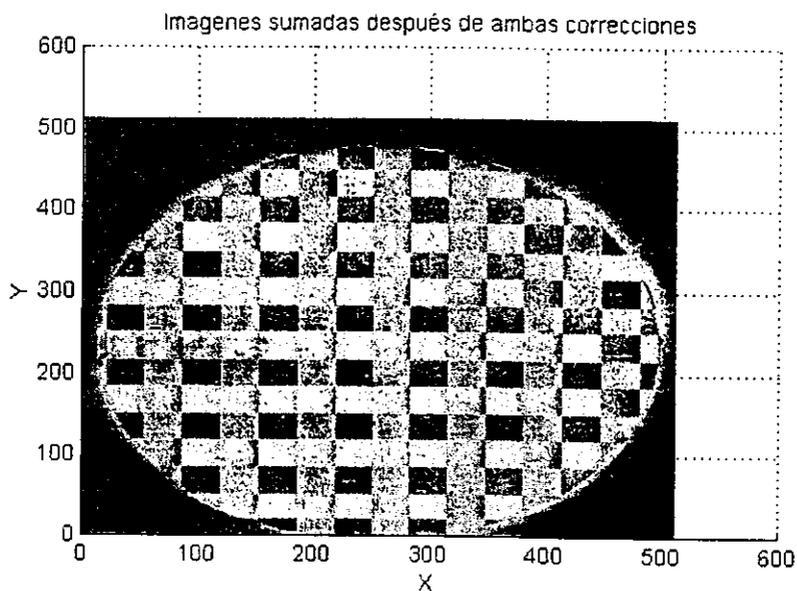


Fig. 47 Imagen final después de aplicarle las matrices de corrección para ambas orientaciones

Como se puede observar de la figura 45 a la figura 47 la aberración por distorsión ha sido eliminada, obteniendo una mejora en la imagen final.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo se deduce que el detector usado presenta una distorsión geométrica muy alta (entre el $\pm 10\%$ y el $\pm 20\%$), comparado con otros optodetectores bidimensionales como los CCD's. Esto puede apreciarse muy fácilmente en las comparaciones de correlación con un patrón ideal. Al valor de esta distorsión contribuyen factores como la naturaleza del enfoque electrostático interno del tubo y la falta de linealidad de la electrónica de lectura. Dado que estas forman parte integral del sistema, no es posible controlarlas de manera sencilla. Otra fuente no considerada (aunque sí controlada) es el efecto del campo magnético de la tierra, en nuestro caso éste efecto es peligroso debido a que el detector es adaptado a un telescopio, el cual cambiará de orientación constantemente y por lo tanto el valor de la distorsión cambiará en función de la posición de apuntado del telescopio.

La alta distorsión geométrica del detector impide que sea usado en algunos instrumentos que requieren de una alta resolución, no obstante, el método abre la posibilidad de ser aplicado a otros detectores. Un paso final es la construcción de las diversas matrices de corrección considerando variaciones en el campo magnético.

Es importante recalcar que gran parte de la instrumentación se desarrolló a lo largo de este trabajo, y representa para mí, más que una evaluación de las cualidades ópticas de un sistema, el haber aprendido como es integrado un sistema de adquisición en sus diversas etapas como son electrónica, cómputo y mecánica, así como el uso de las herramientas que me permitieron llevar a cabo el análisis numérico necesario.

Un punto muy importante para mí fue la reafirmación, ampliación y aplicación de conceptos aprendidos a lo largo de mi formación en la Facultad de Ciencias como, fotoconductividad, fotoemisión, teoría de aberraciones ópticas, transformada de Fourier, teorema de muestreo, correlación, entre otros, aplicados a la adquisición y procesamiento de imágenes ópticas, sin dejar a un lado los conceptos en las áreas de electrónica, electricidad, física moderna y matemáticas. En donde todos y cada uno de ellos forman una parte medular del presente trabajo.

APÉNDICE 1

Manual de la tarjeta prototipo JDR

PURPOSE

The JDR prototype card for the AT was designed to reduce the amount of time necessary for an engineer, technician or hobbyist to implement new hardware for the 16 bit bus. During layout, careful attention to small details has provided an easy to use and highly functional card.

For example, noise de-coupling has been built into the extensive power and ground layers on opposite sides of the card. Usually, this would require a 4 layer board to achieve the same effect. Other features of the card include a breadboarding area that places few restrictions on component placement and silkscreened legends on both sides for easier wiring and scoping.

CUSTOMER SUPPORT

The JDR-PR10 should perform well for you. If it does not, please contact your dealer, or call the Customer Support Department at JDR Microdevices. The toll free number is 800-538-5000. Please include a daytime phone number when writing.

HOW IT WORKS

A copy of the IBM Personal Computer AT Technical Reference manual will be very helpful in understanding this explanation and the schematics that follow.

IC's U1, U5, U6, and U10 are bi-directional data bus buffers. In order to keep bus loading equal to or less than two 74LS loads, it is necessary to buffer the memory and I/O data bus.

IC's U1 and U5 buffer 16 bits of I/O, and U6 and U10 buffer 16 bits of memory data.

IC's U2, U3, U4, and U9 are uni-directional buffers. In addition to the full address bus, they also buffer several of the control bus signals.

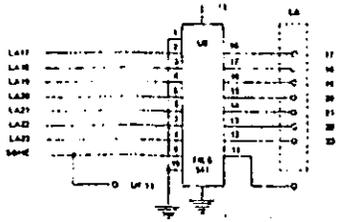
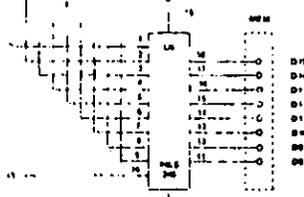
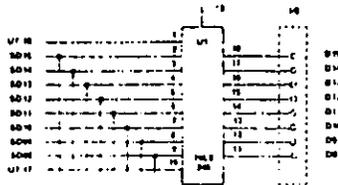
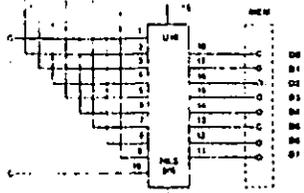
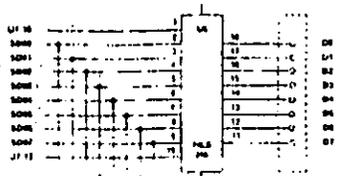
IC's U7 and U8 are normally configured to use PAL16L8's. Our parts kit uses the program examples that follow to burn the PAL's. If you need to decode other addresses or use other control signals, then you will probably need the use of a PAL programmer and Programmable Logic Device (PLD) compiler.

JDR Microdevices carries both the PAL programmer and a PLD compiler. The programmer will burn 20 and 24 pin PAL's from TI, MMI, and National. The PLD compiler called CUPL is a starter kit. It comes with 4 PAL's and can compile fuse burn patterns for the PAL16L8 and 8 others.

Notice that the first examples use conventional addresses in the hex 300 through 31F range, and that all transfers are expected to be 16 bits wide. The third example, not supported by our parts kit, shows how you could decode byte-wide and word-wide addresses.

You will notice that the memory bus buffers do not have a wired connection to the decode and direction circuitry. In order to remain as flexible as possible, and because most designs are either memory or I/O and not both, we have left those connections unmade. Connect points are provided for applications that will make use of both buffers.

Also, please remember that the label names for SELECT pins A-Q are reassignable if you program your own PAL's.



PROGRAM EXAMPLE 1

```
Name      JDRATU7 286 PROTO.
Partno    JDRATU7;
Date      12/17/87.
Revision  01.
Designer  DGM.
Company   JDR MICRODEVICES.
Assembly  00000;
Location  PCAT U7.
Device    P16L8.
```

```
.....
/ THIS IS THE PAL FOR JDR'S AT PROTOTYPE CARD /
.....
/ Allowable Target Device Types: P16L8 /
.....
```

```
/* Inputs */
```

```
Pin 1 = !MEMW      : /* ANY MEMORY WRITE      */
Pin 2 = !MEMR      : /* ANY MEMORY READ      */
Pin 3 = !IOR       : /* INPUT OUTPUT READ    */
Pin 4 = !IOW       : /* INPUT OUTPUT WRITE   */
Pin 5 = !SMEMR     : /* MEMORY READ INSIDE 1 MEG */
Pin 6 = !SMEMW     : /* MEMORY WRITE INSIDE 1 MEG */
Pin 7 = !AEN       : /* DMA ADDRESS ENABLE   */
Pin 8 = !PORTEQUAL : /* COMPARATOR OUTPUT    */
Pin 9 = !SA0       : /* ADDRESS A0           */
Pin 11 = !SBHE     : /* BUS HIGH ENABLE      */
Pin 16 = !8BIT     : /* 8 BIT DEVICE WHEN TIED HIGH "K" */
```

```
/* Outputs */
```

```
Pin 12 = !O16CS    : /* 16 BIT XFER IN PROCESS "P" */
Pin 13 = !LO_ENABLE : /* LOW BYTE BUFFER ENABLE "M" */
Pin 14 = !BIOW     : /* BUFFERED IO WRITE     "M" */
Pin 15 = !HI       : /* SELECT HI BYTE ON     "L" */
Pin 17 = !HI_ENABLE : /* HIGH BYTE BUFFER ENABLE "M" */
Pin 18 = !BIOR     : /* BUFFERED IO READ      "M" */
Pin 19 = !BLOCK_DCD : /* CARD IS SELECTED     */
```

```
/* Declarations and Intermediate Variable Definitions */
```

```
IO = IOR & IOW;
IOECCODE = PORTEQUAL & !AEN;
16BIT = !8BIT;
```

```
/* Logic Equations */
```

```
LO_ENABLE = IO & !8BIT & IOECCODE
           # IO & !SA0 & IOECCODE;

HI_ENABLE = IO & 16BIT & IOECCODE & SBHE;

HI = 16BIT & SBHE;

O16CS = 16BIT & IOECCODE;

BIOR = IOR;
BIOW = IOW;
```

PROGRAM EXAMPLE 2

```
Name      JDRATU8 286 PROTO.
Partno    JDRATU8;
Date      12/17/87;
Revision  00;
Designer  DGM;
Company   JDR MICRODEVICES;
Assembly  00000;
Location  PCAT U8;
Device    P16L8.
```

```
.....
/ THIS IS THE PAL FOR JDR'S AT PROTOTYPE CARD /
.....
/ Allowable Target Device Types: P16L8 /
.....
```

```
/* Inputs */
```

```
Pin 1 = SA0        : /* ADDRESS A0           */
Pin 2 = SA1        : /* ADDRESS A1           */
Pin 3 = SA2        : /* ADDRESS A2           */
Pin 4 = SA3        : /* ADDRESS A3           */
Pin 5 = SA4        : /* ADDRESS A4           */
Pin 6 = SA5        : /* ADDRESS A5           */
Pin 7 = SA6        : /* ADDRESS A6           */
Pin 8 = SA7        : /* ADDRESS A7           */
Pin 9 = SA8        : /* ADDRESS A8           */
Pin 11 = SA9       : /* ADDRESS A9           */
Pin 17 = !HI      : /* HI FROM U7          */
Pin 18 = !BLOCK_DCD : /* CARD IS SELECTED + ALSO A OUT */
```

```
/* Outputs */
```

```
Pin 12 = !IG       : /* OUTPUT G            */
Pin 13 = !IF       : /* OUTPUT F            */
Pin 14 = !IE       : /* OUTPUT E            */
Pin 15 = !ID       : /* OUTPUT D            */
Pin 16 = !IC       : /* OUTPUT C            */
Pin 19 = !PORTEQUAL : /* COMPARATOR OUTPUT   */
```

```
/* Declarations and Intermediate Variable Definitions */
```

```
FIELD ADDRESS = [SA9..1]; /* NOTICE TO NOT INCLUDED */
LO = !SA0;
```

```
/* Logic Equations */
```

```
/* This is the logic in JDR's pre-burned device. It tends
to assume that you are controlling devices that have
CHIP SELECT lines and ADDRESS lines going to them.
If that is not the case, you will want to burn your own
logic devices, or further decode the SELECT lines in
the prototype area.
```

```
F = ADDRESS[300..303] & BLOCK_DCD; /*FIRST BLOCK */
E = ADDRESS[304..307] & BLOCK_DCD; /*SECOND BLOCK */
D = ADDRESS[308..308] & BLOCK_DCD; /*THIRD BLOCK */
C = ADDRESS[309..309] & BLOCK_DCD; /*FOURTH BLOCK */
PORTEQUAL = ADDRESS[309..309]
```

PROGRAM EXAMPLE 3

Name JDRATU8 286 PROTO.
 Partno JDRATU8
 Date 12/17/87.
 Revision 01.
 Designer DGM.
 Company JDR MICRODEVICES.
 Assembly 00000.
 Location PCAT U8.
 Device P16LB.

THIS IS THE PAL FOR JDRS AT PROTOTYPE CARD

Allowable Target Device Types: P16LB

Inputs

Pin 1 = SA0 // ADDRESS A0
 Pin 2 = SA1 // ADDRESS A1
 Pin 3 = SA2 // ADDRESS A2
 Pin 4 = SA3 // ADDRESS A3
 Pin 5 = SA4 // ADDRESS A4
 Pin 6 = SA5 // ADDRESS A5
 Pin 7 = SA6 // ADDRESS A6
 Pin 8 = SA7 // ADDRESS A7
 Pin 9 = SA8 // ADDRESS A8
 Pin 11 = SA9 // ADDRESS A9
 Pin 17 = HI // HI FROM U7
 Pin 18 = BLOCK_DCD // CARD IS SELECTED - ALSO A OUT

Outputs

Pin 12 = IG // OUTPUT G
 Pin 13 = IF // OUTPUT F
 Pin 14 = IE // OUTPUT E
 Pin 15 = ID // OUTPUT D
 Pin 16 = IC // OUTPUT C
 Pin 19 = PORTEQUAL // COMPARATOR OUTPUT

Declarations and Intermediate Variable Definitions

FIELD ADDRESS = [SA9..1];
 LO = SA0;

Logic Equations

Use this logic to control discrete chip enables or when the controlled device does not use any address lines.

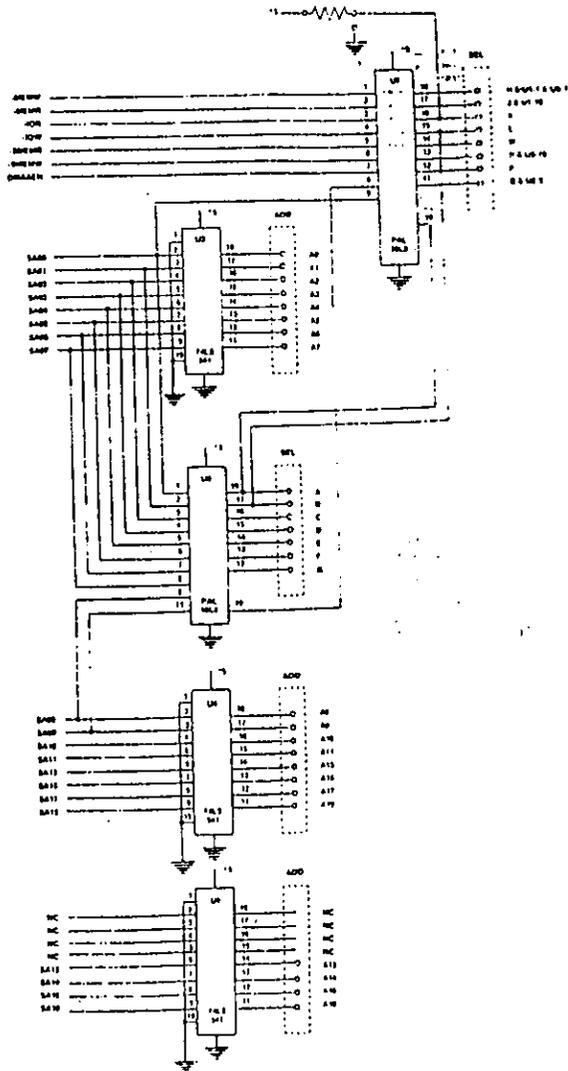
F = ADDRESS[300] & LO & BLOCK_DCD; //FIRST SELECT

E = ADDRESS[301] & HI & BLOCK_DCD; //SECOND SELECT

D = ADDRESS[302] & LO & BLOCK_DCD; //THIRD SELECT

C = ADDRESS[303] & HI & BLOCK_DCD; //FOURTH SELECT

PORTEQUAL = ADDRESS[300,301];



APÉNDICE 2

Medidas obtenidas con el microdensitómetro para el cálculo de la aberración de distorsión geométrica de la lente Nikon de 200 mm.

Si consideramos las medidas del ancho y espacio de las líneas a medir sobre el eje x , es decir, la orientación de cada línea de patrón es perpendicular al eje x .

Patrón horizontal

Las columnas representan las variaciones en el ancho de las líneas y el espacio entre ellas. (De 1 a 20).

Los renglones representan las variaciones de 10 micras en 10 micras a lo largo de la altura de las líneas. (De 20 a 59)..

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
28	0085.1	0209.6	0331.8	0455.5	0577.1	0700.0	0822.1	0945.4	1066.6	1190.0	1311.6
29	0085.8	0209.6	0332.3	0455.4	0577.0	0700.0	0821.7	0945.1	1066.2	1189.7	1311.1
30	0086.0	0209.7	0331.6	0455.8	0576.9	0700.5	0821.2	0945.3	1066.1	1189.6	1311.1
31	0086.6	0210.9	0332.5	0456.7	0577.8	0701.1	0822.4	0946.3	1067.2	1190.8	1311.4
32	0087.6	0211.5	0333.1	0457.5	0578.4	0702.1	0822.6	0947.1	1067.6	1191.4	1312.1
33	0087.7	0212.6	0334.0	0458.0	0578.6	0702.6	0823.4	0947.2	1067.9	1191.3	1311.9
34	0089.0	0212.8	0334.8	0458.1	0579.5	0703.5	0824.0	0947.5	1068.3	1191.5	1312.3
35	0089.3	0213.5	0334.6	0458.5	0579.4	0703.3	0823.9	0947.7	1068.3	1191.7	1312.2
36	0090.1	0214.3	0335.3	0459.1	0579.9	0703.3	0824.3	0947.5	1068.9	1191.5	1312.5
37	0091.0	0214.5	0336.0	0459.3	0579.5	0703.3	0824.2	0948.3	1068.2	1191.6	1312.3
38	0090.5	0214.8	0336.0	0459.7	0580.5	0704.0	0824.5	0948.0	1068.7	1192.3	1312.5
39	0090.8	0215.1	0336.3	0460.0	0580.6	0704.3	0825.0	0949.0	1069.0	1192.5	1312.5
40	0091.0	0214.7	0336.5	0460.3	0581.1	0704.5	0825.1	0948.6	1069.3	1192.5	1313.0
41	0091.5	0215.3	0336.3	0460.6	0580.9	0705.1	0825.1	0948.6	1068.6	1192.5	1312.9
42	0091.7	0216.1	0336.4	0460.9	0581.2	0705.0	0825.3	0949.1	1068.8	1192.1	1313.2
43	0092.5	0216.6	0336.6	0461.0	0581.7	0705.4	0825.5	0949.2	1069.2	1192.8	1312.7
44	0092.5	0216.3	0336.6	0460.8	0580.9	0705.4	0825.2	0949.3	1069.1	1192.9	1313.1
45	0092.4	0216.5	0337.0	0461.6	0581.7	0705.9	0826.2	0949.8	1069.5	1193.0	1313.5
46	0092.1	0216.5	0337.4	0461.8	0581.7	0705.5	0827.1	0950.0	1070.3	1193.8	1313.0
47	0091.0	0215.2	0336.6	0460.9	0581.2	0704.9	0825.8	0949.4	1069.5	1193.3	1313.5
48	0091.4	0216.7	0338.1	0462.0	0581.7	0706.0	0824.7	0950.3	1070.4	1194.4	1313.2
49	0091.8	0216.8	0336.7	0461.1	0581.6	0705.3	0826.0	0949.8	1070.4	1193.3	1312.8
50	0092.0	0216.4	0336.9	0461.4	0581.7	0706.5	0825.8	0949.1	1069.7	1193.4	1313.4
51	0092.8	0216.1	0337.8	0461.1	0581.3	0705.4	0825.5	0949.7	1069.9	1193.2	1313.1
52	0091.8	0215.9	0336.8	0461.5	0580.6	0703.8	0824.8	0949.7	1069.7	1193.5	1312.8
53	0091.5	0216.1	0337.4	0461.6	0581.1	0705.2	0825.9	0949.7	1070.1	1193.5	1313.1
54	0091.5	0216.1	0336.0	0460.4	0581.3	0705.1	0825.4	0949.2	1069.9	1193.5	1314.0
55	0091.5	0214.5	0336.1	0460.0	0580.2	0704.2	0824.5	0948.8	1069.3	1193.0	1313.5
56	0090.8	0214.8	0336.1	0460.3	0581.0	0704.5	0824.8	0949.0	1069.5	1192.8	1313.2
57	0089.8	0213.6	0335.3	0459.9	0580.1	0704.0	0824.8	0949.1	1069.4	1193.2	1313.6
58	0089.3	0213.5	0335.1	0459.3	0580.3	0703.9	0825.3	0949.2	1069.6	1193.1	1314.2
59	0089.5	0214.1	0335.1	0458.7	0580.4	0704.5	0825.1	0948.8	1069.0	1193.5	1313.5

Apéndice 2

	12	13	14	15	16	17	18	19	20
28	1434.6	1556.9	1679.3	1801.7	1925.1	2047.0	2170.0	2293.0	2417.7
29	1434.6	1555.2	1678.8	1800.3	1923.4	2045.8	2168.3	2291.0	2414.5
30	1433.7	1555.1	1678.8	1800.2	1923.5	2045.3	2168.2	2290.9	2412.2
31	1434.6	1555.5	1679.0	1800.5	1923.9	2045.9	2168.5	2290.6	2413.7
32	1435.0	1556.2	1679.5	1800.6	1924.6	2046.0	2168.9	2290.8	2413.7
33	1435.4	1556.1	1679.5	1800.8	1923.8	2045.4	2168.4	2290.5	2413.5
34	1435.6	1556.5	1679.7	1801.4	1923.8	2045.3	2168.9	2290.9	2413.3
35	1435.1	1556.2	1680.0	1799.8	1923.4	2045.1	2168.4	2290.1	2413.2
36	1436.0	1556.5	1679.7	1800.4	1924.0	2045.0	2168.5	2290.2	2413.5
37	1435.8	1556.4	1679.8	1800.1	1924.1	2045.0	2168.2	2290.5	2412.8
38	1436.0	1556.8	1680.0	1800.1	1924.1	2044.8	2168.5	2289.5	2413.2
39	1436.4	1557.0	1680.0	1800.5	1923.9	2044.6	2168.5	2289.5	2412.6
40	1436.8	1556.9	1680.2	1800.4	1924.0	2044.5	2167.7	2289.0	2412.0
41	1436.4	1557.1	1680.1	1800.4	1923.5	2043.9	2167.0	2288.5	2411.2
42	1436.5	1556.5	1680.0	1800.4	1924.3	2044.3	2167.7	2289.0	2412.0
43	1436.5	1556.5	1680.2	1800.5	1924.1	2044.3	2167.5	2288.5	2413.2
44	1436.9	1556.7	1680.5	1800.7	1924.7	2045.1	2168.5	2288.3	2412.3
45	1436.5	1557.3	1680.8	1801.2	1924.8	2045.5	2169.1	2289.5	2413.5
46	1436.1	1556.7	1680.2	1800.9	1924.5	2045.3	2168.3	2288.6	2412.5
47	1436.1	1557.1	1680.4	1800.3	1924.2	2044.3	2169.0	2288.6	2412.8
48	1436.7	1557.0	1680.5	1800.7	1925.0	2045.0	2168.0	2290.1	2413.8
49	1436.8	1557.6	1681.0	1801.0	1924.8	2045.6	2168.0	2288.7	2412.2
50	1436.8	1557.0	1680.9	1801.2	1924.8	2045.4	2168.9	2289.1	2412.0
51	1436.8	1557.3	1680.5	1800.9	1924.9	2044.5	2168.7	2289.2	2412.7
52	1436.0	1557.2	1680.7	1801.4	1924.9	2045.4	2169.3	2289.7	2413.5
53	1437.1	1557.5	1680.9	1800.5	1924.8	2045.9	2169.1	2290.0	2413.8
54	1437.9	1557.2	1681.7	1802.0	1925.0	2045.3	2169.9	2290.6	2414.2
55	1437.9	1557.3	1680.7	1801.2	1925.3	2046.3	2168.7	2290.4	2414.2
56	1437.7	1557.5	1681.0	1801.9	1924.9	2045.7	2169.5	2290.4	2414.0
57	1437.3	1558.7	1681.4	1801.6	1925.4	2045.8	2169.5	2290.8	2414.0
58	1437.9	1557.3	1681.4	1801.9	1926.0	2047.3	2170.3	2291.7	2415.2
59	1437.4	1557.7	1681.3	1801.8	1925.9	2046.9	2170.5	2291.8	2414.8

Patrón vertical.

Las columnas representan las variaciones en el ancho de las líneas y el espacio entre ellas. (De 1 a 20).

Los renglones representan las variaciones de 10 micras en 10 micras a lo largo de la altura de las líneas. (De 31 a 54).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
31	0049.7	0172.9	0295.3	0418.3	0541.3	0664.0	0785.2	0907.5	1028.8	1151.6
32	0050.1	0173.0	0295.9	0418.3	0540.4	0663.5	0784.8	0907.9	1028.8	1152.4
33	0050.3	0172.9	0296.2	0418.5	0540.7	0663.1	0784.7	0907.7	1028.5	1152.5
34	0050.6	0173.3	0296.7	0418.5	0540.9	0664.0	0785.4	0907.9	1029.7	1152.6
35	0051.0	0175.0	0296.3	0419.1	0540.6	0664.0	0785.6	0908.3	1029.1	1152.0
36	0052.0	0174.7	0296.6	0419.3	0541.2	0664.3	0786.2	0908.9	1029.7	1152.4
37	0051.8	0175.3	0296.8	0420.0	0541.7	0665.2	0786.5	0909.0	1029.7	1153.1
38	0052.0	0175.3	0297.0	0419.8	0542.3	0665.1	0786.3	0909.4	1030.0	1153.0
39	0052.3	0175.2	0297.1	0420.7	0541.6	0665.4	0786.5	0908.8	1029.7	1153.4
40	0052.0	0175.8	0297.5	0420.6	0542.0	0665.0	0786.1	0909.8	1029.8	1153.1
41	0052.7	0175.7	0298.3	0421.0	0542.8	0665.1	0786.4	0909.7	1030.8	1152.9
42	0051.8	0175.6	0297.7	0421.0	0543.0	0665.5	0786.9	0910.1	1030.5	1153.6
43	0051.5	0175.2	0297.5	0420.7	0542.7	0666.4	0787.7	0911.0	1031.8	1154.7
44	0052.5	0176.0	0298.0	0421.2	0543.4	0666.9	0787.2	0910.3	1031.4	1154.8
45	0050.8	0174.7	0298.0	0421.3	0542.8	0666.2	0787.5	0909.9	1031.2	1154.4
46	0051.5	0175.2	0297.2	0420.9	0542.6	0665.6	0787.0	0910.4	1031.2	1154.4
47	0051.3	0175.5	0297.7	0421.8	0541.7	0665.6	0787.0	0910.8	1032.0	1155.1
48	0050.8	0175.0	0297.5	0420.8	0541.7	0666.4	0787.0	0911.0	1031.7	1156.0
49	0050.5	0174.3	0296.7	0420.8	0542.0	0666.2	0786.8	0911.1	1031.8	1155.4
50	0049.9	0174.5	0296.6	0420.1	0541.8	0666.2	0786.3	0910.4	1031.6	1155.0
51	0048.5	0173.8	0296.0	0420.4	0541.8	0666.1	0786.1	0910.0	1030.9	1155.0
52	0048.5	0173.1	0295.9	0419.3	0540.6	0664.8	0786.2	0910.3	1030.8	1155.5
53	0048.6	0172.6	0295.0	0419.0	0541.3	0664.5	0787.3	0909.3	1031.4	1154.8
54	0048.4	0172.6	0295.1	0418.5	0540.7	0664.1	0786.4	0909.8	1031.3	1154.7

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
31	1272.3	1395.5	1516.8	1639.2	1760.0	1882.8	2004.1	2127.2	2248.4	2372.1
32	1272.9	1395.6	1515.9	1640.0	1760.0	1883.3	2004.3	2127.8	2248.8	2372.1
33	1272.6	1395.7	1516.5	1640.3	1760.2	1882.6	2003.7	2127.5	2248.6	2372.4
34	1277.3	1396.6	1517.2	1639.8	1761.2	1883.8	2004.7	2127.5	2249.0	2371.5
35	1273.2	1396.4	1516.6	1639.7	1760.8	1883.2	2004.5	2126.7	2248.4	2372.6
36	1273.2	1396.5	1517.6	1640.5	1760.7	1884.1	2004.8	2128.2	2248.7	2372.9
37	1274.1	1397.1	1517.5	1640.1	1761.6	1884.4	2005.1	2128.3	2249.5	2372.9
38	1273.8	1397.2	1517.8	1640.9	1761.8	1884.0	2005.0	2127.4	2249.8	2372.8
39	1273.3	1396.5	1517.1	1641.1	1761.1	1884.3	2004.6	2128.4	2249.0	2372.9
40	1273.9	1396.6	1516.7	1640.8	1761.1	1884.1	2004.5	2129.0	2249.4	2372.9
41	1274.3	1397.6	1518.0	1640.8	1762.4	1884.4	2005.6	2129.3	2250.0	2373.9
42	1274.6	1397.8	1518.0	1641.8	1762.4	1886.2	2006.4	2129.8	2250.8	2374.0
43	1275.5	1398.7	1518.9	1642.3	1762.5	1887.9	2006.4	2130.0	2250.4	2374.1
44	1274.7	1398.5	1519.0	1642.4	1763.2	1885.7	2006.3	2130.0	2250.9	2374.9

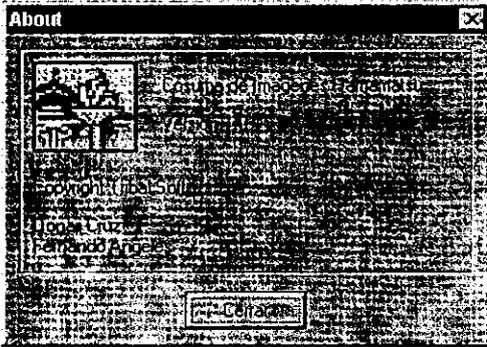
Apéndice 2

45	1275.5	1397.9	1518.9	1643.0	1763.7	1886.0	2006.0	2130.1	2251.3	2375.2
46	1275.5	1398.2	1518.2	1642.5	1762.8	1885.3	2007.2	2130.6	2251.1	2375.2
47	1275.3	1399.4	1519.2	1643.6	1763.9	1886.0	2006.3	2130.3	2252.0	2376.0
48	1275.8	1399.4	1519.0	1643.6	1763.6	1887.3	2007.3	2131.2	2252.3	2375.7
49	1275.8	1399.8	1519.4	1643.0	1763.5	1887.5	2007.4	2131.1	2252.3	2376.4
50	1275.6	1399.8	1519.6	1643.5	1763.8	1887.4	2007.6	2131.8	2252.3	2377.1
51	1276.0	1399.3	1519.8	1644.0	1764.4	1889.0	2008.1	2132.3	2252.9	2377.9
52	1275.8	1399.7	1520.4	1644.3	1764.1	1889.2	2008.4	2132.2	2253.4	2377.9
53	1276.2	1399.4	1520.8	1644.0	1764.5	1889.3	2009.6	2132.9	2254.6	2377.7
54	1275.8	1399.5	1520.3	1644.5	1765.0	1889.1	2009.2	2132.5	2254.1	2378.1

	21
31	2493.0
32	2493.4
33	2493.6
34	2491.1
35	2493.4
36	2493.8
37	2494.0
38	2493.6
39	2493.0
40	2494.2
41	2494.0
42	2494.5
43	2496.0
44	2496.0
45	2495.7
46	2496.1
47	2496.5
48	2496.6
49	2496.6
50	2496.9
51	2498.2
52	2497.8
53	2498.8
54	2499.7

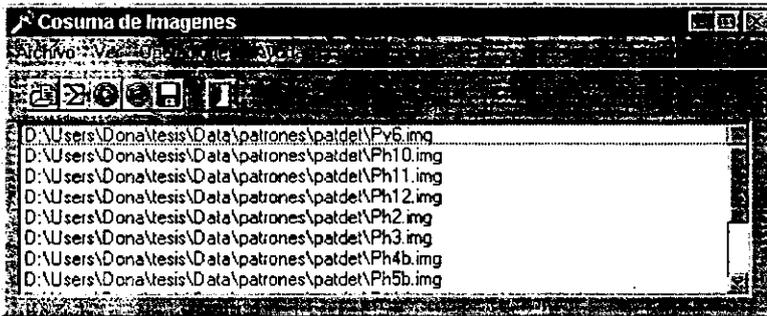
APÉNDICE 3

I. COSUMA



Presentado a través de un manejo de ventanas de manera amigable:

Ventana principal



Comandos:

Archivo

Abrir.- Abre los archivos de imágenes *.img, obtenidos por el detector Hamamatsu.

Guardar.- Guarda la cosuma efectuada a los archivos abiertos con extensión *.img.

Salir.- Cierra Cosuma.

Ver

Selección.- Muestra en la ventana secundaria el archivo elegido en la ventana archivo de la ventana principal.

Cosuma.- Muestra en la ventana secundaria la cosuma efectuada.

Operaciones

Cosuma.- Efectua la operación de cosuma las imágenes abiertas.

Ayuda: Muestra la ventana de información sobre Cosuma.

Iconos:



Abrir.- Abre los archivos de imágenes *.img, obtenidos por el detector Hamamatsu.



Cosuma.- Efectua la operación de cosuma las imágenes abiertas.



Muestra la selección.- Muestra en la ventana secundaria el archivo elegido en la ventana archivo de la ventana principal.



Muestra la cosuma.- Muestra en la ventana secundaria la cosuma efectuada.



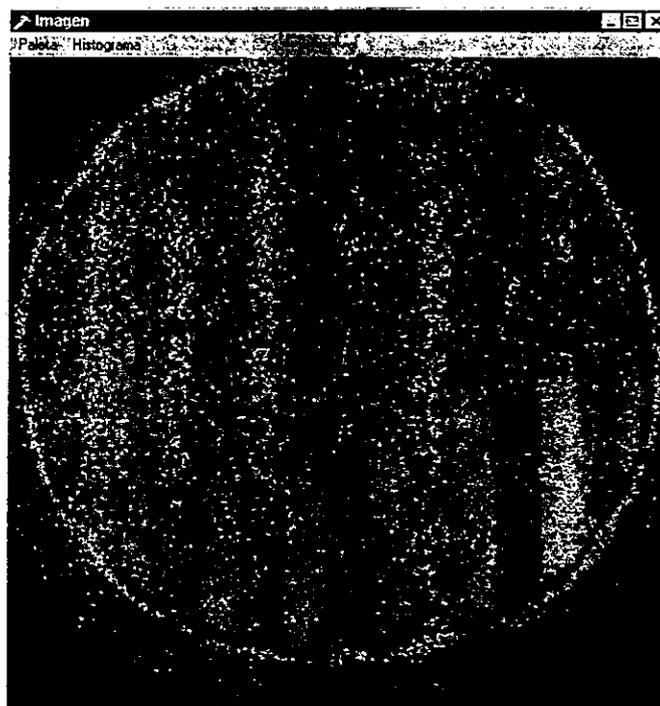
Guardar.- Guarda la cosuma efectuada a los archivos abiertos con extensión *.img.



Salir.- Cierra Cosuma.

Ventana secundaria

Se despliegan en ella la imagen seleccionada y la cosuma de las imágenes.



Comandos de la ventana secundaria:

Paleta

Carga.- Carga una nueva paleta de colores y la aplica a la imagen mostrada.

Restablece.- Restablece la paleta de colores original de la imagen.

Histograma.- Despliega el histograma de la imagen.

II. CONVERSIÓN DE LA IMAGEN de *.img a *.tif.

Programa realizado por Donají Xóchitl Cruz López.

Program Extract;

Const HeaderSize = 1118;

Var F,H : File;

Head : Array[1..HeaderSize] of Byte;

Begin

Assign(F,'Blanco.TIF');

Reset(F,1);

BlockRead(F,Head,HeaderSize);

Close(F);

Assign(H,'Header2.Bin');

Rewrite(H,1);

BlockWrite(H,Head,HeaderSize);

Close(H);

End.

BIBLIOGRAFÍA

1. Riecke, G. H., Detection of light from the ultraviolet to the submillimeter. Cambridge University Press, USA, (1994).
2. Angeles, F., Analizador de posición de eventos para un detector bidimensional tipo mepsicon. Tesis Profesional, Fac. de Ciencias, UNAM; (1986).
3. Dennis, P.N.J., Photodetectors: An introduction to current technology. Up Dates in Applied Physics and Electrical Technology, Plenum Press, USA (1986).
4. Hawkes, J. et al., Optoelectronics: An introduction. Prentice- Hall International Inc., USA, (1983).
5. Bezdid'ko, S. N., The use of Zernike polynomials in optics. Soviet Journal of Optical Technology, Vol.41(9), pp 425-429. (1974).
6. Hecht, E. Et al. Optics. Addison -Wesley Publishing Company, USA, (1974).
7. Buchdahl, Hans A, Optical aberration coefficients. Dover, EUA, (1968), 424 p.
8. Optics in astronomy Cambridge University, EUA ,(1993) #xi, 288 p
9. Buchdahl, Hans A, Optical aberration coefficients. Dover, EUA, (1968), 424 p.

10. Maréchal, A. Étude des effets combinés de la diffraction et des aberrations géométriques sur l'image d'un point lumineux.
Revue d'Optique, France, Vol.26(9), pp. 257-277. (1974).
11. Reynolds, G. et al. The new physical optics notebook; Tutorials in Fourier Optics.
SPIE Optical Engineering, EUA, (1989).
12. Steward, E. G., Fourier Optics an introduction.
John Wiley & Sons, USA, (1983).
13. Duffieux, P.M., L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique.
Masson et Cie., France, (1970).
14. Cochran, W. et al., What is the Fast Fourier Transform?
IEEE, Trans. Audio Electroacoust. Vol. AU-15, pp.45-55. (1967).
15. Mahajan, Virendra N. Aberration theory made simple
Bellingham, E.U., International Society for Optical Engineering, c1991, No. xx, 166 p.
16. Geyl, R., Le calcul des combinaisons.
Masson et Cie., France, (1976).
17. Angeles, U.F., Interfase de lectura PC Compatible-PIAS (Hamamatsu).
Reporte técnico 98-01, Instituto de astronomía. CU. Febrero de 1998.
18. Gonzalez, Rafael C.; Woods R., "Digital image processing".
Addison-Wesley, Massachusetts, EUA., 1992, 716 p.
19. Jain, A. Fundamentals of digital image processing.
Prentice-Hall, Inc., USA, (1989).
20. www.mathworks.com