

16  
2 y



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
Escuela Nacional de Estudios Profesionales Acatlán

*FILTRO DIGITAL EN EL PROCESO  
DE IMAGENES.*

T E S I S  
Que para obtener el Título de  
LICENCIADO EN MATEMATICAS APLICADAS  
Y COMPUTACION

p r e s e n t a

**FRANCISCO ZAMORA GONZALEZ**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F. 1 9 9 1



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## Capítulo I Fundamentos de Imágenes Digitales

<b>I.1</b>	Desarrollo del Proceso Digital de Imágenes	
-	Crestomatía	1
-	Campos de Investigación del Proceso Digital de Imágenes	7
-	Aplicaciones del Proceso Digital de Imágenes	8
<b>I.2</b>	Formación de Imágenes y el Sentido Visual	
-	Sistema Visual	10
-	Iris	
-	Cristalino	
-	Retina	
-	Nervio Optico	
	<b>Figura I.A</b> Corte Sagital del Ojo	14
-	Cerebro	15
	<b>Figura I.B</b> Sistema Visual Humano	17
-	Visión Computacional	18
	<b>Figura I.C</b> Sistema Visual Artificial	20
<b>I.3</b>	Elementos del Sistema de Proceso Digital de Imágenes	
-	Dominio Visual	21
-	Pretratamiento	
-	Visualización	
-	Subsistema Operacional	
-	Auxiliares	22
-	Sistema de Proceso	
	<b>Figura I.D</b> Interface Digitalizadora	23
<b>I.4</b>	Modelo de Imagen Digital	24
<b>I.5</b>	Muestreo y Cuantificación	26
	<b>Conclusión I</b>	28

## **Capítulo II Transformación Matemática de Imágenes**

<b>II.1</b>	<b>Introducción a la Transformada de Fourier</b>	
-	Concepto de la Transformada de Fourier .....	31
<b>II.2</b>	<b>Transformada Discreta de Fourier</b> .....	34
<b>II.3</b>	<b>Transformada Discreta Bidimensional de Fourier</b> ...	36
<b>II.4</b>	<b>Propiedades de la Transformada Discreta de Fourier</b>	
-	Separabilidad .....	38
-	Traslación .....	39
-	Periodicidad y Simetría Conjugada .....	40
-	Distribuitividad y Escalamiento .....	42
-	Rotación .....	43
-	Valor Promedio .....	44
-	Convolución .....	44
-	Correlación .....	53
-	Muestreo .....	55
<b>II.5</b>	<b>Transformada Rápida de Fourier</b> .....	64
-	Algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier ...	65
-	Número de Operaciones .....	68
-	Transformada Rápida de Fourier Inversa .....	88
	<b>Conclusión II</b> .....	70

## Capítulo III Filtro Digital para Proceso de Imágenes

III.1 Filtros en el Dominio de Frecuencia Espectral	...	71
III.2 Filtros Pasa Baja		
- Filtro Ideal	.....	74
- Filtro Parabólico	.....	75
- Filtro Butterworth	.....	76
- Filtro Exponencial	.....	77
- Filtro Gaussiano	.....	78
- Filtro Trapezoidal	.....	79
- Filtro Rampa	.....	79
III.3 Filtros Pasa Alta		
- Filtro Ideal	.....	81
- Filtro Parabólico	.....	82
- Filtro Butterworth	.....	82
- Filtro Exponencial	.....	83
- Filtro Gaussiano	.....	84
- Filtro Trapezoidal	.....	85
- Filtro Rampa	.....	85
III.4 Evaluación y Análisis Espectral		
- Porcentaje de Energía Filtrada	.....	87
- Funciones Multicanal Isótropos Pasa Baja	.....	88
- Funciones Multicanal Isótropos Pasa Alta	.....	89
- Funciones Multicanal Isótropos Pasa Banda	.....	91
III.5 Filtros en el Dominio Espacial		
- Filtros de Respuesta Impulsiva Finita	.....	92
Conclusión III	.....	95

## Capítulo IV Aplicaciones

<b>IV.1</b>	<b>Criterios de Sistematización</b>	
-	Nivel de Computación o Cálculo	97
-	Nivel de Algoritmo o Proceso	98
	Proceso Puntual	
	Proceso por Area	
	Proceso por Cuadro	
	Proceso Geométrico	
	Proceso en el Dominio Espectral de Fourier	
-	Nivel de Componentes Físicos o Equipo	99
	Tarjetas de Captación y Despliegue	
	Tarjetas con Procesadores Integrados	100
	Proceso en Paralelo	101
	Introducción	102
<b>IV.2</b>	<b>Imágenes Prototipo (a) (b)</b>	<b>103</b>
-	Definición de la Tarea Visual	
-	Solución de la Tarea Visual	
-	Equipo de Proceso	
<b>IV.3</b>	<b>Digitalización de Registros Geofísicos</b>	<b>105</b>
-	Definición de la Tarea Visual	
-	Solución de la Tarea Visual	
-	Equipo de Proceso	
-	Discusión	
<b>IV.4</b>	<b>LandSat IV</b>	<b>107</b>
-	Definición de la Tarea Visual	
-	Solución de la Tarea Visual	
-	Equipo de Proceso	
-	Discusión	
	<b>Conclusión IV</b>	<b>112</b>

## Apéndice A Rutinas para Proceso Digital de Imágenes

- Código Fuente	.....	115
- Inclusión de Librerías Prototipos del Lenguaje C	...	116
- Declaración de Constantes Enteras		
- Declaración de Constantes Reales		
- Declaración de Variables (tipos compuestos)	.....	117
- Declaración de Variables Globales		
- Declaración de Núcleos de Convolución Espacial	.....	118
- Declaración de Prototipos	.....	121
Tipo [A] Proceso Puntual		
Tipo [B] Proceso por Area		
Tipo [C] Proceso por Cuadro	.....	122
Tipo [E] Proceso en el Dominio Espectral de Fourier		
- Esquema General	- Funciones Lógicas [A]	... 123
- Histograma de Desarrollo	- Funciones Lógicas [A]	... 124
- Definición	- Funciones Lógicas [A]	... 125
- Esquema General	- Funciones Aritméticas [A]	.. 127
- Histograma de Desarrollo	- Funciones Aritméticas [A]	.. 128
- Definición	- Funciones Aritméticas [A]	.. 129
- Esquema General	- Funciones Estadísticas [A]	130
- Histograma de Desarrollo	- Funciones Estadísticas [A]	131
- Definición	- Funciones Estadísticas [A]	132
- Esquema General	- Función Aritmética [B]	.. 135
- Histograma de Desarrollo	- Función Aritmética [B]	.. 136
- Definición	- Función Aritmética [B]	.. 137
- Esquema General	- Funciones Lógicas [C]	... 138
- Histograma de Desarrollo	- Funciones Lógicas [C]	... 139
- Definición	- Funciones Lógicas [C]	... 140
- Esquema General	- Funciones Aritméticas [C]	142
- Histograma de Desarrollo	- Funciones Aritméticas [C]	143
- Definición	- Funciones Aritméticas [C]	144
- Esquema General Procedimiento Espectral de Fourier [E]		145
- Histograma Transformada Rápida de Fourier Unidimensional 1024 datos reales [E]	.....	149
(comparación entre la versión implementada y la versión MathCad v2.0)		
- Tabla de Referencia del Histograma [E]	.....	150
- Definición - Funciones Espectrales Fourier [E]	....	151



## **Apéndice B IMP DIP D6124 Tarjeta de Digitalización de Video**

- Características .....	173
<b>Figura B.1</b> .....	174
- Descripción	
- Entrada de Video	
- Sincronización de Video .....	175
- Banco de Memoria por Cuadro	
- Emisión de Video	
- Especificaciones .....	176
- Emisión de Video Monocromático (cámara ITC-56 Ikegami CCTV) .....	177
- Conversión Analógico Digital (convertidor RCA CA3300D CMOS) .....	178

## **Apéndice C Aplicaciones del Proceso Digital de Imágenes**

- Reseña .....	181
- Titanic, Vehículos Remotamente Operados .....	182
- Arte, Conservación, Restauración y Catálogo .....	183
- Robótica, Guía Mecánica en Tiempo Real .....	184
- Tendencia en Investigación y Desarrollo .....	186

## **Apéndice D**

- Glosario .....	109
------------------	-----

## **Apéndice E Bibliografía**

- Información Bibliográfica .....	207
- Información Hemerográfica .....	209
- Referencias Clásicas .....	215
- Conferencias Presenciadas .....	216

**CAPITULO I  
FUNDAMENTOS DE  
IMAGENES DIGITALES**

1.1 DESARROLLO DEL PROCESO DIGITAL DE IMAGENES	1.2 FORMACION DE IMAGENES Y EL SENTIDO VISUAL	1.3 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE PROCESO DIGITAL DE IMAGENES	1.4 MODELO DE IMAGEN DIGITAL	1.5 MUESTREO Y CUANTIFICACION UNIFORME
- HISTORIA - TECNOLOGIA	- SENTIDO MAGICO (OJO HUMANO)	- EN GENERAL - EN PARTICULAR	- FISICO - MATEMATICO	- CONCEPTO
<ul style="list-style-type: none"> <li>• cronología I, II, III, IV, V 1920, ..., 1991</li> <li>• inicios, avances representativos, desarrollo científico - tecnológico</li> <li>• campos de investigación</li> <li>• aplicaciones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sistema visual humano (anatomía)</li> <li>• definición funcional de componentes visuales</li> <li>• visión computacional</li> <li>• esquemas: I.A ojo humano I.B sistema visual humano I.C visión artificial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dominio visual</li> <li>• pretratamiento</li> <li>• visualización</li> <li>• subsistema operacional</li> <li>• auxiliares</li> <li>• sistema de proceso</li> <li>• esquemas: I.D interface digitalizadora</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• modelo formal esquemático</li> <li>• ecuaciones: I.1, ..., I.5</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• complemento matemático</li> <li>• linealidad en el muestreo</li> <li>• ecuaciones: I.6, ..., I.18</li> </ul>
paginas [1-9]	paginas [10-20]	paginas [21-23]	paginas [24-25]	paginas [26-27]

**CONCLUSION I**

paginas [28-30]

## I.1 DESARROLLO DEL PROCESO DIGITAL DE IMÁGENES

### Crestomatía:

La siguiente descripción esboza de manera general los aspectos científicos, tecnológicos, de negocios y sociales que han influido al desarrollo del Proceso Digital de Imágenes, ésta no pretende ser una clasificación absoluta ni mucho menos completa, es sin embargo una asociación que conjuga tanto los aspectos tecnológicos, que incluyen la microelectrónica y la física de estado sólido, como los matemáticos e históricos y finalmente los aspectos relacionados con los procesos cognoscitivos y adaptativos del hombre.

### Etapa 1920 - 1938 período: 18 años

Para inicios de la década de los años veinte [64], la actividad periodística se enriquecía con la transmisión de imágenes por cable submarino a través del sistema Bartlans, de eventos relevantes involucrando a los principales diarios europeos y norteamericanos. La fidelidad de tales imágenes era representada por quince tonos de gris; los sistemas de transmisión combinados hacen posible abarcar más extensiones territoriales, retransmitiendo por cable, telégrafo y radio. Surgen los primeros circuitos de transmisión, aparatos que precederían al teletipo convencional.

En 1924 Thomas L. Watson funda IBM [55] fusionando a Computing Tabulating Recording Company, International Time Recording, Rayton Scale Company y Hollerith Company. El patrocinio científico y de investigación de ésta compañía juega un papel relevante en el desarrollo de algoritmos y sistemas, así como de recursos humanos, para su explotación en la tecnología de Proceso Digital de Imágenes.

### Etapa 1939 - 1958 período: 19 años

Se desencadena la Segunda Guerra Mundial, iniciándose con ello el Proceso Digital de Señales unidimensionales, principalmente para determinar trayectorias balísticas.

La ejecución de operaciones aritméticas y lógicas se realiza en la computadora en su unidad central, mediante el uso de tubos electrónicos [19], [51]; este uso constituye la característica tecnológica que identifica a los procesadores electrónicos de la llamada Primera Generación de Computadoras como Instrumentos de Cálculo (1950-1958). La EDVAC Electronic Discrete Variable Automatic Computer, desarrollada hacia 1948 en Princeton University por John von Neuman y Arthur Eckert, es el prototipo que representa a las arquitecturas de las computadoras digitales secuenciales; siendo ésta el tipo de arquitectura comercialmente más difundida.

Fecha de lanzamiento	Nación	Nombre	Tipo	Hechos Notables
4 Octubre 1959	URSS	Lunik III	sonda	transmitió imágenes de la cara oculta de la Luna.
28 Junio 1964	EE.UU.	Ranger VII	sonda	transmitió 4.300 imágenes de la superficie lunar hasta 200 metros antes de estrellarse.
29 Noviembre 1964	EE.UU.	Mariner IV	sonda	a 15.200 Km de Marte transmitió digitalmente 21 imágenes.
18 Julio 1965	URSS	Zond III	sonda	registró imágenes de aproximadamente 9 millones de kms. cuadrados de la Luna.
31 Enero 1966	URSS	Lunik IX	sonda	transmitió imágenes a nivel de la superficie lunar.
30 Mayo 1966	EE.UU.	Surveyor I	sonda	autómata que envió alrededor de 10.000 imágenes analógicas a nivel de la superficie lunar.
1 Febrero 1966	EE.UU.	ESFA I	satélite	aplicación meteorológica terrestre auxiliada por imágenes.
12 Agosto 1966	EE.UU.	Cerberus I	sonda	fotografió los lugares más aptos para alunizar.

Estas son algunas de las series de misiones de exploración espacial que emplearon Proceso Digital de Imágenes. La NASA ha enviado sondas con tecnología más avanzada: Galileo es una sonda que orbitará Júpiter, para finales de 1995. Magallanes rastrea desde el 12 de septiembre de 1990 la superficie de Venus, en una misión que durará 243 días, por medio de radar; en Diciembre de 1999, la NASA contempla el uso del Martian Lander, adaptado con tecnología de análisis visual en tiempo real; denominado PIFEX Programmable Image Feature Extractor, desarrollado a partir de 1985 en el Jet Propulsion Laboratory, operado por el California Institute of Technology para la NASA.

En Abril de 1965 se publica el Algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier [23], [24] por J. S. Cooley y J. W. Tukey, desarrollado en IBM Watson Research Center, New York N.Y. En ese entonces se definen las tendencias del Pro. so Digital de Imágenes.

#### Etapa 1978 - 1984 periodo 2 años

A finales de la década de los setenta, el Dr. David Marr en su libro Vision propone una Teoría Espacial de la Visión [14], [20], [25], [21], [22] desarrollada en el Massachusetts Institute of Technology MIT, resumiendo a tres los factores involucrados en el proceso de una tarea particular de visión, cualquiera que ésta fuera [Conclusión I página 28].

Numerosas facilidades de computación de propósito general han sido arduas de la mayoría de los esfuerzos para generar programas y sistemas operativos relacionados con Proceso Digital de Imágenes. Durante el desarrollo de estos programas, varios sistemas operativos orientados a imágenes han evolucionado para llenar las necesidades de los usuarios en términos de administración de datos, proceso historial de registros y programas de utilidad en general. En adición a los sistemas operativos, existen varios programas de aplicación que cubren un amplio espectro de técnicas y procedimientos, desde los académicos hasta los pragmáticos.

Entre 1977 y 1981 surge la Cuarta Generación de Computadoras [18] como instrumentos para Procesos de Comunicación. Con el desarrollo de la microelectrónica, la tecnología de las comunicaciones y el reconocimiento de formas logrados en esta cuarta generación, el camino para la Robotica y la Automatización Industrial a escala masiva, queda abierto. Los desarrollos de la Inteligencia Artificial tienen un impacto importante en éste proceso.

## Campos de Investigación del Proceso Digital de Imágenes:

El desarrollo tecnológico del Proceso Digital de Imágenes ha definido lo que hoy es conocido como la Ciencia de la Visión [3], [60], [91], [92], descomponiéndose esta en cinco campos de investigación, sus objetivos están relacionados con las aplicaciones potenciales que los patrocinan. A continuación una descripción de las ramas en las que se divide esta ciencia:

### Proyectos de Codificación de Imágenes,

La investigación ha sido dirigida hacia sistemas de codificación digital para representar imágenes con un mínimo de bits de precisión, principalmente para almacenamiento y transmisión.

### Proyectos de Restauración de Imágenes,

La restauración implica perfeccionar la fidelidad de una imagen compensando las degradaciones causadas por el sensor, el canal de transmisión y el dispositivo de despliegue de imágenes. Este proceso ha sido enfocado para proveer imágenes cualitativamente mejores, esto es de manera subjetiva, ya sea para interpretación humana o para postproceso.

### Proyectos de Extracción de Datos de Imágenes,

Las actividades incluyen la extracción y cuantificación de características en las imágenes, el registro espacial de las mismas y la generación de imágenes de proyecciones unidimensionales. Convencionalmente se requiere de preprocesar o restaurar la imagen para obtener una imagen intrínseca, es decir una descripción visual.

### Proyectos de Análisis de Imágenes,

La base de esta investigación radica en las estructuras psicofísicas y matemáticas del Sistema Visual Humano en relación a las imágenes, el objetivo, a partir de modelos matemáticos integrados, es el de desarrollar caracterizaciones significativas de una imagen, como son, cuantificar la calidad e interpretabilidad de la misma.

### Proyectos de Sistemas de Proceso de Imágenes,

Las actividades han incluido la generación de algoritmos, programas, estructuras y lenguajes, también como el desarrollo de equipo experimental para captación, proceso, transmisión, almacenamiento y despliegue de imágenes.

Proceso de Documentos  
 (reconocimiento de caracteres, lectura de documentos  
 gráficos, tecnología OCR),  
Proceso de Registros Geofísicos,  
Recursos Naturales  
 (clasificación, planeación, explotación),  
Televisión, Transmisión de Imágenes y Teleconferencia,  
Animación,  
Visión Robótica y Guía mecánica  
 (análisis de movimiento).

Son ejemplos de las actividades profesionales que hacen uso de imágenes digitales y de forma alguna con el proceso de éstas. Aunque la visión es, estrictamente hablando, concerniente a datos de imágenes de la banda visual de 4000 a 7000 angmströms del espectro electromagnético, los principios computacionales se extienden directamente a imágenes derivadas de muchas otras fuentes, incluyendo Infrarrojo, Fluorescencia de Rayos X, Ultrasonido, Microscopía de Rastreo Electrónico, Radares de Apertura Sintética, Cromatografía de Gas, Radiografía Neutrónica, Espectroscopia Fotoacústica, Termoluminiscencia, Microsonda Laser, de Instrumentos de Percepción Multiespectral. Aún más generalmente, éstos se aplican a muchas otras tareas de percepción, incluyendo Proceso digital de Voz, Interpretación de Sonar, Reconocimiento de Código Morse, Análisis de Espectrogramas en Masa, Señales Sísmicas, Análisis de vibraciones, etcétera [Apéndice C].

La retina está hecha de una capa de celdas, aquellas en la capa final son conocidas como celdas ganglionares. Las celdas fotorreceptoras, bastones y conos actúan como dispositivos de entrada para registrar una imagen mientras que las celdas ganglionares proveen la salida de la retina al cerebro, por medio del nervio óptico.

La siguiente es una descripción anatómico fisiológica de los componentes que intervienen en el Sistema Visual Humano. Cabe hacer notar que la analogía entre éste y cualquier Sistema de Visión Artificial es llevada a cabo a nivel de los resultados, tareas o funciones que realizan sus partes constitutivas y no debe de tomarse como una comparación entre entes homólogos. Finalmente, se expone de forma breve las ideas de Fisiología Visual basadas en estudios de neurocientíficos.

En su primera etapa el proceso visual inicia con la captación de la imagen, es decir, la imagen sobre la retina. Las partes implicadas en éste proceso son el iris, el cristalino y la retina (figura I.A):

### Iris

Está formado principalmente por vasos y por fibras musculares lisas dispuestas en forma circular a modo de esfínter (músculo esfínter de la pupila) y radial. Desempeña funciones análogas a las de un diafragma de un aparato fotográfico, el iris determina la cantidad de luz que entra en el ojo y mejora la nitidez de las imágenes, suprimiendo aberraciones de esfericidad. Entonces el orificio del iris, la pupila, se estrecha o se dilata por actividad refleja, llevando a cabo la adaptación, bajo la acción de las fibras musculares lisas.

### Cristalino

Es una lente biconvexa y transparente situada delante del humor vítreo y detrás del iris, esta formado por una cápsula que rodea a un conjunto de láminas superpuestas (fibras lenticulares). el cristalino está sostenido y es alimentado por el cuerno ciliar, el cual se encuentra entre el iris y la coroidea. Contrayendo o distendiendo la zónula de Zinn mediante fibras musculares circulares y radiales contenidas en él, el cuerno ciliar produce la acomodación, mecanismo que permite enfocar sobre la retina las imágenes ópticas formadas a partir de objetos externos observados por el ojo mediante variaciones del espesor del cristalino. Su función es entonces, la de una lente de poder díptico variable, capaz de enfocar sobre la retina cualquier punto situado en el espacio que atraiga la atención del individuo.



El registro de una imagen por la retina es apenas la primera etapa de la vision. La segunda etapa implica llevar la imagen al cerebro en forma aprovechable, esto es, por medio de la transmisión de la información visual en la que interviene el nervio óptico:

### Nervio Optico

La retina se encuentra en la base de los influjos nerviosos que se dirigen hacia el encéfalo, donde se halla situada la sede de las impresiones visuales. El nervio óptico se ramifica en el fondo del ojo y está formado de:

células sensoriales:      células incoloras,  
    células de cono,  
    células de bastones.

células visuales,

neuronas sensitivas periféricas y

neuronas sensitivas centrales.

El influjo nervioso está retrasado con respecto al excitante, pero dura más tiempo que él, el resultado de este fenómeno es cierta persistencia de las sensaciones visuales, que permite seguir el movimiento de los seres o de los objetos animados.

El ojo representa un sistema óptico que proporciona en la retina, una imagen virtual de los objetos, desde el fotorreceptor, la excitación pasa a una o más neuronas de la capa granulosa externa, y desde ahí se transmite a una o más neuronas de la capa granulosa interna. Estas neuronas están provistos de largas fibras que forman una capa interna de la retina; esas fibras se reúnen a nivel de la papila, por donde salen fuera del glóbulo ocular formando el nervio óptico.

Sin embargo, los ojos no ven, estos son simplemente sensores que captan la información visual, la cual viaja a lo largo de las fibras del nervio optico llegando hasta la quiasma óptica donde la información de cada ojo se cruza (en este contexto, la condición binocular del Sistema Visual Humano, no influye en los conceptos definidos a continuación), así la información de la retina llega a un Primer Nivel.

La siguiente etapa en el Sistema Visual Humano es la del proceso final, es aquí que con ayuda de más de tres millones de neuronas, el cerebro percibe lo que la información visual representa.

## Cerebro

Aquí, el contexto anatómico funcional antes citado no es apropiado en la discusión de Fisiología Visual. Interviene entonces la Psicofísica Visual auxiliada por estudios neurocientíficos.

Así, la información visual de la retina llega a la corteza visual primaria o corteza estriada en la región occipital del cráneo.

¿Pero qué información recibe esta zona cerebral? y ¿Cómo es que las neuronas decodifican la imagen?

Las respuestas a estas preguntas y los conceptos que a continuación se exponen fueron resultado de estudios llevados a cabo en treinta años de investigación neurocientífica; lo que laureó con el Premio Nobel de Medicina a los doctores Dr. David H. Hubel y el Dr. Torsten N. Wiesel de Harvard Medical School.

Ellos determinaron que la zona de interés investigada, es de aproximadamente dos milímetros de espesor y treinta centímetros cuadrados de superficie extendida. Parte de la Fisiología de la corteza visual primaria está especializada en el proceso de líneas, bordes y contrastes entre luz y sombra del ambiente visual y sostienen que no hay imagen por complicada que sea, que no pueda ser reducida a éstos elementos por esta corteza (figura I.B).

¿Pero es todo acerca de la función de la corteza estriada?

Estudios complementarios demuestran que reducir el mundo visual a líneas y bordes no es suficiente, muchas formas visuales no describen líneas ni bordes bien definidos. Existen además células nerviosas que responden a estímulos diferentes, éstas son neuronas sensibles a frecuencias de luz y color. Se determinó entonces, que en la corteza estriada existen varios tipos de neuronas especializadas, para detectar líneas, bordes, contornos y su respectiva dirección y las frecuencias cromáticas que componen los objetos visuales; hay sin embargo, muchas otras células nerviosas en esta zona cuya función aún es desconocida.

En conclusión, la sonda básica de la visión es flexible, plástica y adaptable a un ambiente visual dinámico, pero ya es sólo una pequeña parte de percibir visualmente. El estímulo de imágenes miméticas, ambiguas o específicas, requiere de sondas más allá de la corteza visual primaria, las líneas, los bordes y las frecuencias cromáticas sólo nos dan la sensación de tamaño y forma.

## I.1 DESARROLLO DEL PROCESO DIGITAL DE IMÁGENES

### Crestomatía:

La siguiente descripción esboza de manera general los aspectos científicos, tecnológicos, de negocios y sociales que han influido al desarrollo del Proceso Digital de Imágenes, ésta no pretende ser una clasificación absoluta ni mucho menos completa, es sin embargo una asociación que conjuga tanto los aspectos tecnológicos, que incluyen la microelectrónica y la física de estado sólido, como los matemáticos e históricos y finalmente los aspectos relacionados con los procesos cognoscitivos y adaptativos del hombre.

### Etapa 1920 - 1939 periodo: 18 años

Para inicios de la década de los años veinte [54], la actividad periodística se enriquecía con la transmisión de imágenes por cable submarino a través del sistema Bartlane, de eventos relevantes involucrando a los principales diarios europeos y norteamericanos. La fidelidad de tales imágenes era representada por quince tonos de gris; los sistemas de transmisión combinados hacen posible abarcar más extensiones territoriales, retransmitiendo por cable, telégrafo y radio. Surgen los primeros circuitos de transmisión, aparatos que precederían al teletipo convencional.

En 1924 Thomas A. Watson funda IBM [55] fusionando a Computing Tabulating Recording Company, International Time Recording, Raytheon Scale Company y Hollerit Company. El patrocinio científico y de investigación de esta compañía juega un papel relevante en el desarrollo de algoritmos y sistemas, así como de recursos humanos, para su explotación en la tecnología de Proceso Digital de Imágenes.

### Etapa 1939 - 1958 periodo: 19 años

Se desencadena la Segunda Guerra Mundial, iniciándose con ello el Proceso Digital de Señales unidimensionales, principalmente para determinar trayectorias balísticas.

La ejecución de operaciones aritméticas y lógicas se realiza en la computadora en su unidad central, mediante el uso de tubos electrónicos [18], [55]; este uso constituye la característica tecnológica que identifica a los procesadores electrónicos de la llamada Primera Generación de Computadoras como Instrumentos de Cálculo (1950-1958). La EDVAC Electronic Discrete Variable Automatic Computer, desarrollada hacia 1949 en Princeton University por John von Neuman y Arthur Burks, es el prototipo que representa a las arquitecturas de las computadoras digitales secuenciales; siendo esta el tipo de arquitectura comercialmente más difundida.

Durante los veinte primeros años de la informática, la arquitectura de las computadoras evolucionó poco, esto surgió de la conjunción de una idea y una técnica. La técnica fue la electrónica. La idea, la noción de máquina secuencial de programa registrado.

La visión computacional inició en 1950 con el objetivo de reconocer patrones estadísticos, asignando a una imagen un número pequeño de clases. La tecnología de Proceso Digital de Imágenes, para realce, restauración, codificación y transmisión de imágenes inició por esta época.

Erao 1959 - 1977                      periodo: 18 años

Al final de los años cincuenta, los tubos al vacío son substituidos por transistores en los circuitos aritméticos y lógicos de las unidades centrales. Nace de ésta manera lo que es conocido como la Segunda Generación de los Procesadores Electrónicos (1950-1964) como instrumentos para Proceso Electrónico de Datos.

Posteriormente, en Abril de 1964 aparece en el mercado una nueva serie de procesadores: el sistema 160 de IEM, el cual da origen a la Tercera Generación de este tipo de máquinas como instrumentos de Sistemas de Información. La revolución técnica y organizativa introducida por el procesamiento de los datos a distancia constituye el elemento más importante de esta generación.

Inicia la Carrera Espacial [30], [40], [50], [70] [80], los avances que se registran se enfocan principalmente hacia el programa Apollo Luna y a la exploración espacial; un ambiente profesional e interdisciplinario provee las bases científicas y tecnológicas para analizar la información del espacio exterior. El siguiente es un resumen de los acontecimientos más relevantes, relacionados con el Proceso Digital de Información Misil, realizados principalmente en el Image Processing Laboratory del Jet Propulsion Laboratory en Pasadena California, NASA:

<u>Fecha de lanzamiento</u>	<u>Nación</u>	<u>Nombre</u>	<u>Tipo</u>	<u>Noticias Notables</u>
1 Abril	EE.UU.	Tiros I	satélite	23.000 imágenes meteorológicas de la Tierra.

Fecha de lanzamiento	Nación	Nombre	Tipo	Hechos Notables
4 Octubre 1959	URSS	Lunik III	sonda	transmitió imágenes de la cara oculta de la Luna.
28 Junio 1964	EE.UU.	Ranger VII	sonda	transmitió 4.300 imágenes de la superficie lunar hasta 200 metros antes de estrellarse.
28 Noviembre 1964	EE.UU.	Mariner IV	sonda	a 15.200 Km de Marte transmitió digitalmente 21 imágenes.
18 Julio 1965	URSS	Zond III	sonda	registró imágenes de aproximadamente 8 millones de kms. cuadrados de la Luna.
31 Enero 1966	URSS	Lunik IX	sonda	transmitió imágenes a nivel de la superficie lunar.
30 Mayo 1966	EE.UU.	Surveyor I	sonda	autómata que envió alrededor de 10.000 imágenes analógicas a nivel de la superficie lunar.
3 Febrero 1966	EE.UU.	ESSA I	satélite	aplicación meteorológica terrestre auxiliada por imágenes.
10 Agosto 1966	EE.UU.	Orbiter I	sonda	fotografió los lugares más aptos para alunizar.

Fecha de lanzamiento	Nación	Nombre	Tipo	Hechos Notables
11 Octubre 1968	EE.UU.	Apolo VII	sonda	transmitió imágenes de la Tierra.
Febrero 1969	EE.UU.	Mariner VI	sonda	exploración y transmisión digital visual de la superficie de Marte.
Marzo 1969	EE.UU.	Mariner VII	sonda	fotomosaicos de Marte de los encuentros lejanos.
25 Julio 1972	URSS	Mars V	sonda	transmitió imágenes en órbita en torno a Marte.
1974	EE.UU.	Mariner X	sonda	envió imágenes de Mercurio.
20 Agosto 1975	EE.UU.	Vikings I	sonda	transmite imágenes en blanco y negro, color y bandas del espectro infrarrojo de la superficie marciana.
5 Septiembre 1977	EE.UU.	Voyager I	sonda	transmite imágenes digitales de Júpiter Saturno.
		5 de Marzo 1979		Júpiter
		12 de Noviembre 1980		Saturno.
20 Agosto 1977	EE.UU.	Voyager II	sonda	transmite imágenes digitales de Júpiter Saturno Urano Neptuno.
		9 de Enero 1979		Júpiter 16.000
		25 de Septiembre 1981		Saturno 14.000
		24 de Enero 1986		Urano 6.000
		25 de Agosto 1989		Neptuno.

Estos son algunos de las serie de misiones de exploración espacial que emplearon Proceso Digital de Imágenes. La NASA ha enviado sondas con tecnología más avanzada: Galileo es una sonda que orbitará Júpiter para finales de 1995. Magallanes rastrea desde el 15 de Septiembre de 1990 la superficie de Venus, en una misión que durará 243 días, por medio de radar; en Diciembre de 1998, la NASA contempla el uso del Martian Lander adaptado con tecnología de análisis visual en tiempo real; denominado PIFEX Programmable Image Exabyte EXtractor, desarrollado a partir de 1985 en el Jet Propulsion Laboratory, operado por el California Institute of Technology para la NASA.

En Abril de 1965 se publica el Algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier [22], [24] por L. W. Cooley y J. W. Tukey, desarrollado en IBM Watson Research Center, New York N.Y. En ese entonces se definen las tendencias del Proceso Digital de Imágenes.

#### Etapa 1978 - 1984

período: 6 años

A finales de la década de los setenta, el Dr. David Marr en su libro Vision propone una Teoría Especial de la Vision [14], [16], [15], [17], [21] desarrollada en el Massachusetts Institute of Technology MIT, resumiendo a tres los factores involucrados en el proceso de una tarea particular de visión, cualquiera que ésta fuera [Conclusión I página 20].

Numerosas facilidades de computación de propósito general han sido artificias de la mayoría de los esfuerzos para generar programas y sistemas operativos relacionados con Proceso Digital de Imágenes. Durante el desarrollo de estos programas, varios sistemas operativos orientados a imágenes han evolucionado para llenar las necesidades de los usuarios en términos de administración de datos, proceso historial de registros y programas de utilidad en general. En adición a los sistemas operativos, existen varios programas de aplicación que cubren un amplio espectro de técnicas y procedimientos, desde los académicos hasta los pragmáticos.

Entre 1977 y 1981 surge la Cuarta Generación de Computadoras [18] como instrumentos para Procesos de Comunicación. Con el desarrollo de la microelectrónica, la tecnología de las comunicaciones y el reconocimiento de formas logrados en esta cuarta generación, el camino para la Robótica y la Automatización Industrial a escala masiva, queda abierto. Los desarrollos de la Inteligencia Artificial tienen un impacto importante en éste proceso.

Se inicia la comercialización de sistemas de visión artificial para uso específico.

Etapa 1985 - 1991 periodo: 6 años a la fecha

Actualmente, el tema principal de estudio ha cambiado nuevamente para centrarse en el género humano, en los procesos cognoscitivos, de la inferencia y acumulación de conocimientos. Los avances de la microelectrónica hacen factible imitar los procesos adaptativos de los organismos biológicos y la posibilidad de construir mosaicos de pequeños autómatas para formar tejidos cuya capacidad de asimilación y análisis de imágenes, sea similar a la del ojo humano; uno de los sensores más eficientes de percepción.

Los Sistemas de Conocimiento, es la tendencia de desarrollo de la Quinta Generación de Procesadores Electrónicos.

Se formaliza el Proceso Digital de Imágenes como la Ciencia de la Visión en el área de la Inteligencia Artificial.

Media Laboratory del Massachusetts Institute of Technology MIT, con patrocinio privado y militar realiza estudios de Psicofísica y Neurofisiología Visual asociados al desarrollo de Sistemas de Visión Artificial.



## Campos de Investigación del Proceso Digital de Imágenes:

El desarrollo tecnológico del Proceso Digital de Imágenes ha definido lo que hoy es conocido como la Ciencia de la Visión [3], [60], [91], [92], descomponiéndose ésta en cinco campos de investigación, sus objetivos están relacionados con las aplicaciones potenciales que los patrocinan. A continuación una descripción de las ramas en las que se divide esta ciencia:

### Proyectos de Codificación de Imágenes,

La investigación ha sido dirigida hacia sistemas de codificación digital para representar imágenes con un mínimo de bits de precisión, principalmente para almacenamiento y transmisión.

### Proyectos de Restauración de Imágenes,

La restauración implica perfeccionar la fidelidad de una imagen compensando las degradaciones causadas por el sensor, el canal de transmisión y el dispositivo de despliegue de imágenes. Este proceso ha sido enfocado para proveer imágenes cualitativamente mejores, esto es de manera subjetiva, ya sea para interpretación humana o para postproceso.

### Proyectos de Extracción de Datos de Imágenes,

Las actividades incluyen la extracción y cuantificación de características en las imágenes, el registro espacial de las mismas y la generación de imágenes de proyecciones unidimensionales. Convencionalmente se requiere de preprocesar o restaurar la imagen para obtener una imagen intrínseca, es decir una descripción visual.

### Proyectos de Análisis de Imágenes,

La base de esta investigación radica en las estructuras psicofísicas y matemáticas del Sistema Visual Humano en relación a las imágenes, el objetivo, a partir de modelos matemáticos integrados, es el de desarrollar caracterizaciones significativas de una imagen, como son, cuantificar la calidad e interpretabilidad de la misma.

### Proyectos de Sistemas de Proceso de Imágenes,

Las actividades han incluido la generación de algoritmos, programas, estructuras y lenguajes, también como el desarrollo de equipo experimental para captación, proceso, transmisión, almacenamiento y despliegue de imágenes.

## Aplicaciones del Proceso Digital de Imágenes:

Como resultado de los proyectos de investigación, la explotación comercial se ha diversificado, dando así una idea de la importancia de la relación del hombre con su ambiente visual: Primero, una imagen compila una enorme cantidad de información y conforme la microelectrónica ha desarrollado circuitos de alta integración y reducido los costos de tales, los dispositivos especiales son más accesibles. Segundo, los mismos avances en la tecnología de la microelectrónica han logrado la construcción de dispositivos mejorados para convertir una imagen en forma digital y viceversa (digital analógico). Tercero, el desarrollo de algoritmos sofisticados o procedimientos matemáticos que pueden ser ejecutados por una computadora ha hecho posible llevar a cabo las operaciones de Proceso Digital de Imágenes, lo que alguna vez habría sido imposible o impráctico.

Así, la mayor parte de la información que recibimos proviene del dominio visual y no es de extrañarse la cantidad de dispositivos comerciales de uso específico [1], [4], [5], [29], [29], [30], [31], [32], [35], [36], [37], [38], [39], [44], [49], [63], [67], [77], [83], [93] con los que se dispone para aplicaciones tales como:

- Astronomía,
- Asistencia Comercial y Entrenamiento,
- Base de Datos Pictóricas  
(seguridad, catálogos, archivos, presentaciones),
- Cartografía, Fotorreconocimiento y Reconocimiento Aéreo,
- Colorización de Películas,
- Compresión y Descompresión de Imágenes,
- Control de Calidad y Sistemas de Inspección Industrial  
(reconocimiento, inspección, ensamble y construcción, navegación),
- Cosmetología,
- Criminología, Evidencia Visual y Latentes,
- Diseño Gráfico, CAD, Artes Gráficas y Modelado
- Diseño Textil,
- Fotografía,
- Fotogrametría y Reconstrucción tridimensional
- Imágenes para aplicación Biomédica y de Diagnóstico  
(radiografía, termografía, sonografía, tomografía, fluorescencia, etcétera),
- Imprenta y Publicaciones electrónicas
- Inteligencia Militar  
(reconocimiento automático de objetivos, navegación terrestre y aérea, etcétera),
- Investigación Farmacéutica,
- Manufactura de Semiconductores,
- Microscopía y Micrografía Electrónica
- Percepción Remota  
(imágenes de satélite LANDSAT, SPOT, GOSAT, etcétera),

Proceso de Documentas(reconocimiento de caracteres, lectura de documentos gráficos, tecnología OCR),Proceso de Registros Geofísicos,Recursos Naturales(clasificación, planeación, explotación),Televisión, Transmisión de Imágenes y Teleconferencia.Animación,Visión Robótica y Guía mecánica(análisis de movimiento).

Son ejemplos de las actividades profesionales que hacen uso de imágenes digitales y de forma alguna con el proceso de éstas. Aunque la visión es, estrictamente hablando, concierne a datos de imágenes de la banda visual de 4000 a 7000 angmströms del espectro electromagnético, los principios computacionales se extienden directamente a imágenes derivadas de muchas otras fuentes, incluyendo Infrarrojo, Fluorescencia de Rayos X, Ultrasonido, Microscopía de Rastroo Electrónico, Radars de Apertura Sintética, Cromatografía de Gas, Radiografía Neutrónica, Espectroscopía Fotoacústica, Termoluminiscencia, Microsonda Laser, de Instrumentos de Percepción Multiespectral. Aún más generalmente, éstos se aplican a muchas otras tareas de percepción, incluyendo Proceso Digital de Voz, Interpretación de Sonar, Reconocimiento de Código Morse, Análisis de Espectrogramas en Masa, Señales Sísmicas, Análisis de vibraciones, etcétera [Apéndice C].

## I.2 FORMACION DE IMAGENES Y EL SENTIDO VISUAL

El Sistema Visual Humano consiste de los ojos, los cuales reciben la imagen y la transfieren a varias áreas del cerebro que procesan y analizan la imagen entrante. A través del sistema visual, reconocemos e identificamos objetos y obtenemos una descripción tridimensional de ellos. Todo esto parece simple, natural y sin esfuerzo alguno, solo abrir los ojos y observar. Pero el sistema visual es extremadamente complicado y debe de desarrollar procesos excesivamente complejos para observar nuestro entorno. El punto es, que el sistema visual no es meramente la transferencia de una imagen de un sitio a otro que sirva al observador, éste también analiza e interpreta la imagen e identifica los objetos que aparecen y su ubicación en el espacio.

El estudio del sistema visual es de interés central en la investigación actual del cerebro [141, 1341, 1441, 1461, 1751, 1901, 1911, 1921]. Substanciales datos han sido obtenidos sobre varias áreas del cerebro que involucran al proceso visual.

Los procesos visuales son también una parte importante en investigación de la Ciencia Computacional, incluyendo investigación básica e investigación aplicada. Para procesar datos visuales automáticamente, una cámara electrónica es conectada a una computadora para producir un sistema análogo al Sistema Visual Humano. La imagen es captada por la cámara y los datos pasados a la computadora.

### Sistema Visual:

La imagen que percibimos del mundo exterior pasa a través del cristalino, incidiendo sobre la retina en la parte posterior del alóbullo ocular. Aquí, es registrada por una capa de células sensitivas a la luz, llamadas fotorreceptores, conos y bastonas que actúan como transmisoras, recibiendo la energía de la luz y transmitiendo una señal eléctrica proporcional a la intensidad de la luz recibida. Existen aproximadamente cerca de ciento veinte millones de fotorreceptores en cada ojo, entonces el mundo exterior conceptualmente aparece en esta etapa como una trama de señales individuales, donde cada una representa la intensidad de luz en un punto de la imagen.

### Cómo, qué hay con respecto al proceso?

El ojo ha sido a menudo comparado con una cámara receptora de la imagen y al cerebro visto como una computadora que lo procesa. Sin embargo, la retina también inicia el proceso de la información recibida antes de su transmisión al cerebro para su posterior proceso.

La retina está hecha de una capa de celdas, aquellas en la capa final son conocidas como celdas ganglionares. Las celdas fotorreceptoras, bastones y conos actúan como dispositivos de entrada para registrar una imagen mientras que las celdas ganglionares proveen la salida de la retina al cerebro, por medio del nervio óptico.

La siguiente es una descripción anatómico fisiológica de los componentes que intervienen en el Sistema Visual Humano. Cabe hacer notar que la analogía entre este y cualquier Sistema de Visión Artificial es llevada a cabo a nivel de los resultados, tareas o funciones que realizan sus partes constitutivas y no debe de tomarse como una comparación entre entes homólogos. Finalmente, se expone de forma breve las ideas de Fisiología Visual basadas en estudios de neurocientíficos.

En su primera etapa el proceso visual inicia con la captación de la imagen, es decir, la imagen sobre la retina. Las partes implicadas en este proceso son el iris, el cristalino y la retina (figura I.A):

### Iris

Está formado principalmente por vasos y por fibras musculares lisas dispuestas en forma circular a modo de esfínter (músculo esfínter de la pupila) y radial. Desempeña funciones análogas a las de un diafragma de un aparato fotográfico, el iris determina la cantidad de luz que entra en el ojo y mejora la nitidez de las imágenes, suprimiendo aberraciones de esfericidad. Entonces el orificio del iris, la pupila, se estrecha o se dilata por actividad refleja, llevando a cabo la adaptación, bajo la acción de las fibras musculares lisas.

### Cristalino

Es una lente biconvexa y transparente situada delante del humor vítreo y detrás del iris, está formado por una cápsula que rodea a un conjunto de láminas superpuestas (fibras lenticulares), el cristalino está sostenido y es alimentado por el cuerno ciliar, el cual se encuentra entre el iris y la coroides. Contrayendo o distendiendo la zonula de Zinn mediante fibras musculares circulares y radiales contenidas en él, el cuerno ciliar produce la acomodación, mecanismo que permite enfocar sobre la retina las imágenes ópticas formadas a partir de objetos externos observados por el ojo mediante variaciones del espesor del cristalino. Su función es entonces, la de una lente de poder dióptrico variable, capaz de enfocar sobre la retina cualquier punto situado en el espacio que atraiga la atención del individuo.

Un punto intermedio en el sendero del proceso de la información visual son las capas de la retina, aquí la adaptabilidad de los sensores visuales (conos y bastones) clasifican en base a sus respectivas funciones el tipo de información que los estimula, siendo ésta una etapa de preproceso:

## **Retina**

La retina reviste la cara interna de la coroides, es la expansión nerviosa encefálica, cuya parte sensorialmente activa se expande hasta la ora serrata, es ancha en el fondo del ojo, y su grosor va disminuyendo a medida que se acerca al iris, y forma en la coroides anterior el epitelio pigmentado retiniano. Por delante, está cubierta por la membrana hialoidea. El armazón de la retina está constituido por tres zonas:

La zona Posterior o Porción Coroidal:  
donde se encuentran la papila óptica (punto ciego) donde se expande el nervio óptico, insensible a la impresión luminosa,  
y la mácula lútea (mancha amarilla) punto de mayor agudeza visual.

La zona Media o Porción Ciliar.

La zona Anterior o Porción Irides.

La papila óptica corresponde al punto en que el nervio óptico se introduce en el globo ocular y está situada medialmente y un poco por debajo del polo posterior de éste.

La mácula lútea es una pequeña área oval con una depresión central, la fóvea centralis, que corresponde al polo posterior del globo ocular, sobre el  eje visual. A nivel de la fóvea, la retina presenta modificaciones en sus tejidos que aumentan su sensibilidad, ésta es la zona en la cual el individuo enfoca automáticamente, por vía refleja, las imágenes que forman el objeto de su atención.

La retina está formada por varias capas. El estímulo luminoso excita a las células visuales o fotorreceptores, que son de dos tipos: los bastones, elementos de la visión escotópica o visión nocturna, adaptados a la sensibilidad luminosa, predominantes en la periferia de la retina, y los conos, elementos de la visión fotópica o visión diurna, adaptados a la sensibilidad cromática, más numerosos en la zona macular y únicas células visuales presentes en la región fóvea.

El registro de una imagen por la retina es apenas la primera etapa de la visión. La segunda etapa implica llevar la imagen al cerebro en forma aprovechable, esto es, por medio de la transmisión de la información visual en la que interviene el nervio óptico:

### Nervio Optico

La retina se encuentra en la base de los influjos nerviosos que se dirigen hacia el encéfalo, donde se halla situada la sede de las impresiones visuales. El nervio óptico se ramifica en el fondo del ojo y está formado de:

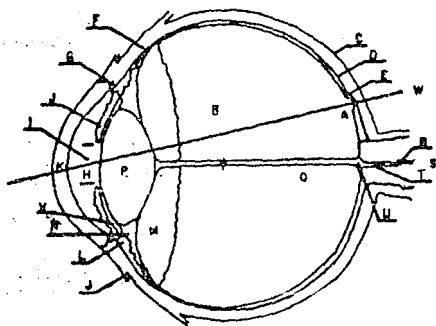
- células sensoriales:      células incolores,
- células de cono,
- células de bastones.
- células visuales,
- neuronas sensitivas periféricas y
- neuronas sensitivas centrales.

El influjo nervioso está retrasado con respecto al excitante, pero dura más tiempo que él, el resultado de este fenómeno es cierta persistencia de las sensaciones visuales, que permite seguir el movimiento de los seres o de los objetos animados.

El ojo representa un sistema óptico que proporciona en la retina, una imagen virtual de los objetos, desde el fotorreceptor, la excitación pasa a una o más neuronas de la capa granulosa externa, y desde ahí se transmite a una o más neuronas de la capa granulosa interna. Estas neuronas están provistas de largas fibras que forman una capa interna de la retina; esas fibras se reúnen a nivel de la papila, por donde salen fuera del globo ocular formando el nervio óptico.

Sin embargo, los ojos no ven, estos son simplemente sensores que captan la información visual, la cual viaja a lo largo de las fibras del nervio óptico llegando hasta la quiasma óptica donde la información de cada ojo se cruza (en este contexto, la condición binocular del Sistema Visual Humano, no influye en los conceptos definidos a continuación), así la información de la retina llega a un Primer Nivel.

La siguiente etapa en el Sistema Visual Humano es la del proceso final, es aquí que con ayuda de más de tres millones de neuronas, el cerebro percibe lo que la información visual representa.



- |                    |                                |
|--------------------|--------------------------------|
| A MACULA LUTEA     | L CUERPO CILIAR                |
| B HUMOR VITREO     | M PROCESOS CILIARES            |
| C ESCLEROTICA      | N ZONULA DE ZINN               |
| D COROIDES         | P CRISTALINO                   |
| E RETINA           | Q MEMBRANA HIALOIDEA           |
| F ORA SERRATA      | R VENA DE LA RETINA CENTRAL    |
| G CANAL DE SCHLEMM | S NERVIU OPTICO                |
| H HUMOR ACUOSO     | T ARTERIA DE LA RETINA CENTRAL |
| I IRIS             | U PAPILA OPTICA                |
| J PUPILA           | U CAMARA POSTERIOR             |
| K CORNEA           | W EJE VISUAL                   |

CORTE SAGITAL DEL SENSOR DEL SISTEMA VISUAL HUMANO

FIGURA 1.A



## Cerebro

Aquí, el contexto anatómico funcional antes citado no es apropiado en la discusión de Fisiología Visual. Interviene entonces la Psicofísica Visual auxiliada por estudios neurocientíficos.

Así, la información visual de la retina llega a la corteza visual primaria o corteza estriada en la región occipital del cráneo.

¿Pero qué información recibe esta zona cerebral? y ¿Cómo es que las neuronas decodifican la imagen?

Las respuestas a estas preguntas y los conceptos que a continuación se exponen fueron resultado de estudios llevados a cabo en treinta años de investigación neurocientífica; lo que laureó con el Premio Nobel de Medicina a los doctores Dr. David H. Hubel y el Dr. Torsten N. Wiesel de Harvard Medical School.

Ellos determinaron que la zona de interés investigada, es de aproximadamente dos milímetros de espesor y treinta centímetros cuadrados de superficie extendida. Parte de la fisiología de la corteza visual primaria está especializada en el proceso de líneas, bordes y contrastes entre luz y sombra del ambiente visual y sostienen que no hay imagen por complicada que sea, que no pueda ser reducida a éstos elementos por esta corteza (figura I.B).

¿Pero es todo acerca de la función de la corteza estriada?

Estudios complementarios demuestran que reducir el mundo visual a líneas y bordes no es suficiente, muchas formas visuales no describen líneas ni bordes bien definidos. Existen además células nerviosas que responden a estímulos diferentes, éstas son neuronas sensibles a frecuencias de luz y color. Se determinó entonces, que en la corteza estriada existen varios tipos de neuronas especializadas, para detectar líneas, bordes, contornos y su respectiva dirección y las frecuencias cromáticas que componen los objetos visuales; hay sin embargo, muchas otras células nerviosas en esta zona cuya función aun es desconocida.

En conclusión, la senda básica de la visión es flexible, plástica y adaptable a un ambiente visual dinámico, pero ya es sólo una pequeña parte de percibir visualmente. El estímulo de imágenes miméticas, ambiguas o específicas, requiere de sendas más allá de la corteza visual primaria; las líneas, los bordes y las frecuencias cromáticas sólo nos dan la sensación de tamaño y forma.

Estudios del Dr. Marvin M. Minsky de MIT, determinarán que después de su ensamble, la información visual sigue dos senderos, el primero se localiza en la parte superior cerebral, en el lobulo parietal, y el segundo en la parte inferior del cerebro, la parte ventral del lóbulo temporal.

El primer sendero realiza computaciones visuales muy específicas, su función es decirnos donde están las cosas dentro del campo visual, es decir las relaciones espaciales y de orientación, proceso que se realiza de forma ininterrumpida y consiente.

En el segundo sendero, a partir de una serie de etapas similares entre sí, se determina la naturaleza de los objetos, una descripción visual propiamente dicha. Aquí existen células cerebrales muy específicas y son activadas a manera de memoria visual en correspondencia única y exclusiva con el estímulo acumulado, se les llama células acumulativas y su función depende de un proceso concurrente entre muchas otras células en la senda visual; así de una forma asociativa describen detalladamente la información visual que captan, como un sistema visual de propósito especial. Este sendero no se limita a estímulos acumulados, puede además identificar y retener particularidades o excepciones visuales con auxilio de la parte cognoscitiva del cerebro, localizado en la parte frontal del mismo.



## **Visión Computacional:**

Una de las preguntas mas relevantes en esta etapa es,

### ¿Pueden las computadoras ver?

Muchos investigadores, especialmente aquellos relacionados en el área de la Inteligencia Artificial, están tratando de desarrollar sistemas con capacidad limitada para ver. Aquí, los fotoreceptores de la retina son reemplazados por una cámara electrónica la cual capta la energía de la luz, principalmente reflejada, convirtiéndola en señales eléctricas y muestreando un gran número de puntos en el campo visual, 252,144 para una cámara de televisión convencional, convirtiéndolos en el mismo número de señales, con cada señal representando la intensidad de luz al punto correspondiente en el campo. Las señales son transmitidas digitalmente a la computadora, y la imagen está representada por un arreglo de números. La computadora procesa entonces estos números y particularmente describe los objetos captados.

Sin embargo la imagen recibida por una cámara de televisión es bidimensional como en la línea de un solo ojo, perdiendo la dimensión de profundidad, la cual está dada por la distancia de la cámara a diferentes puntos en el espacio. Cuando observamos, vemos un mundo tridimensional, una bola no se aprecia como un disco sino como una esfera y podemos entonces juzgar que tan alejada está.

### ¿Como puede ser derivada la forma de objetos tridimensionales a partir de una representación bidimensional?

El Sistema Visual Humano lo hace de varias formas y estudios en visión computacional tratan de aplicar estos métodos a sistemas artificiales estereoscópicos; el Sistema Visual Humano identifica un objeto eficientemente y sin esfuerzo, sea una mesa, una puerta, una pluma, un auto en movimiento, etcétera. No solo reconocemos un gran número de objetos en diferentes ángulos sino que nuestra memoria preserva un gran número de objetos conocidos; fácilmente comparamos un rostro que no hemos visto por mucho tiempo con una amplia colección en nuestra memoria.

### ¿Tienen los sistemas computarizados capacidades similares a las del cerebro humano?

La respuesta básicamente es NO, actualmente el proceso empleado en identificación y reconocimiento de objetos por nuestro sistema visual aun no está totalmente definido y no puede ser aplicado a sistemas computacionales del todo.

Pero se puede suponer que cuando estos sistemas sean mejor comprendidos, su aplicación a sistemas computacionales llevará a nuevos y mejores sistemas de visión artificial, no obstante, los sistemas computarizados actuales, se desarrollan bien dentro de límites reducidos.

¿Por qué es tan difícil elaborar un sistema de visión artificial?

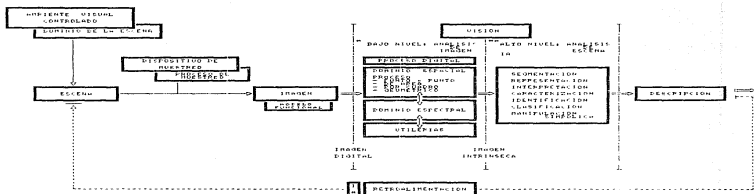
Uno de los principales obstáculos lo constituye la formidable potencia de cálculo necesaria, factor que, por otra parte, todavía no se ha conseguido estimar correctamente. Actualmente, se sabe que son una docena los centros cerebrales implicados en la actividad de la visión: la retina, provista de cien millones de conos y bastones y cuatro capas de neuronas suplementarias, efectúa diez mil millones de operaciones por segundo antes de que imagen retinal llegue al nervio óptico.

¿Cómo reproducir la enorme potencia de cálculo necesaria para el tratamiento de cantidades de información tan importantes?

No se trata simplemente de un problema de tamaño de computadora, también interviene la arquitectura del sistema. Esto quiere decir que es necesario idear estructuras de cálculo especialmente adaptadas para el tratamiento simultáneo de datos bidimensionales. Estructuras paralelas, en cascada, sistólicas, hipercúbicas, celulares, neuronalas son palabras que en realidad, encubren trabajos extraordinariamente importantes; y cuyo objetivo es uno solo, el tratamiento rápido, preciso y simultáneo de un gran número de datos.

La conexión entre visión humana y la teoría de sistemas visuales artificiales es muy valiosa en investigación de visión. Cada rama auxilia a la otra considerablemente, los investigadores de la Visión Artificial tratan con un sistema de complejidad tremenda y son asistidos por la comprensión teórica del proceso visual biológico. Por otra parte, los constructores de sistemas computarizados tienen mucho que aprender del Sistema Visual Humano y un tiempo relativamente amplio pasará antes que los sistemas de Visión Artificial comiencen a aproximarse al alto nivel de desarrollo de nuestro sistema visual.

### VISION ARTIFICIAL



- IA = INTELIGENCIA ARTIFICIAL
- IA = CONOCIMIENTO ADQUIRIDO AL RESUELTOR (OPERACION DE LA IMAGEN)
- IA = CONOCIMIENTO ADQUIRIDO A LA APLICACION
- IA = SISTEMA DE CONSTRUCCION DE PROGRAMAS

VIRTUALMENTE LA MAYORIA DE LOS SISTEMAS SON DE PROPOSITO ESPECIAL Y DERIVAN DE LAS REPLICACIONES DE SU FUNCION HUMANA ESPECIALIZADA O DE LA TECNICA SOLAPADA. LA MAYORIA SE DESARROLLAN UNA TAREA PARTICULAR EN UN AMBIENTE VISUAL CONTROLADO, SON RESOLVEDORES MUY ESPECIFICAMENTE DISEÑADOS O SON PARTES DE UN SISTEMA DE PROPOSITO GENERAL.

FIGURA 1-C

### I.3 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE PROCESO DIGITAL DE IMAGENES

Un sistema integral para Proceso Digital de Imagenes consta, además de los elementos de programas (software) esquematizados anteriormente, de elementos de equipo (hardware) de los cuales existen gran diversidad de dispositivos que cumplen con las funciones básicas de captación, proceso, transmisión, almacenamiento y despliegue de la información visual. La estructura general está esquematizada en la figura I.D.

Los puntos relevantes para la elección de estos dispositivos [0], [E], [I], [21], [25], [71], [73], [82], [85], se esbozan a continuación en sus partes principales:

#### Dominio Visual

##### Imagen:

dominio de la escena.  
ambiente visual controlado (explícito o implícito).  
reflectancia probable del dominio visual a  
iluminación del ambiente.

#### Pretratamiento

##### Digitalizador:

dispositivo de muestreo (cámara)  
(sensores pasivos o sensores activos).  
ancho de banda del espectro electromagnético.  
tipo de digitalización (relativo a la aplicación).  
tipo de conversión analógico-digital.  
precisión de cuantificación (bits/pixel) y  
resolución de muestreo espacial (pixels/lineal).

#### Visualización

##### Monitor:

tipo de señal de video  
(estándares de transmisión MISC, CCIR, RS-170, etc.).  
convención digital-analógica y  
resolución.

#### Subsistema Operacional

##### Almacenamiento:

tipo de memoria (secuencial o aleatoria).  
velocidad de acceso y  
capacidad de acceso al volumen de información visual  
(resolución horizontal x vertical x bits/pixel).

## Auxiliares

### Consola del Operador:

interactividad (rango de control) y  
sistema especial (especifico a la aplicación).

## Sistema de Proceso

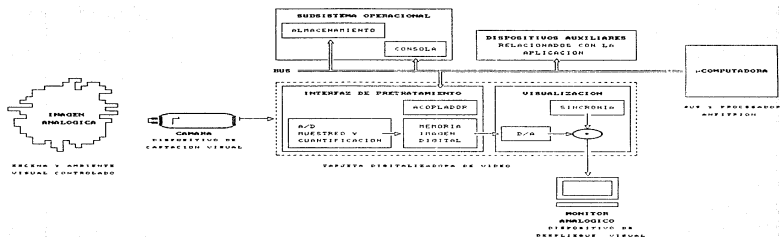
### Computadora:

tipo de arquitectura  
(secuencial, paralela, celular, neuronal,  
sistólica, etcétera.),  
procesador(es) central(es),  
coprocesador(es)  
(procesadores digitales de señales),  
capacidad RAM (bancos de memoria virtual),  
frecuencia de operación,  
periféricos (aplicación) y  
compatibilidad (formato digital de la información).

## [Apéndice B].



## INTERFACE DIGITALIZADORA



ESQUEMA DE LA INTERFAZ ELECTRONICA PARA ADQUISICION DIGITAL EN TIEMPO REAL DE IMAGENES POR MICROCOMPUTADOR

FIGURA 1.D

#### 1.4 MODELO DE IMAGEN DIGITAL

El valor de brillantez de cada punto en la imagen está determinado por varios factores físicos en el correspondiente ambiente visual de la escena [1], [E], [2], [54], como son:

la iluminación incidente,  
las características reflectivas de la superficie,  
la orientación de la superficie relativa al observador y a la fuente de luz,  
las características de absorción y difusión del medio en el que interviene,  
las características geométricas y fotométricas del sensor,  
la distancia del sensor al punto,  
la localización de las acobinas y fuentes de luz y los colores de los objetos y la capacidad del lente de filtrar el color o no, por medio de filtros analógicos.

Una imagen entonces simplifica o encodifica mucha información acerca de la escena, cada uno de estos factores físicos representa una variable que define un modelo complejo pero implícito; sin embargo la información está confundida en el simple valor de brillantez de cada punto.

Mas aun, la información relacionada con la estructura tridimensional de la escena se pierde en la proyección bidimensional de la imagen.

El término brillantez se refiere entonces, en su modelo más simple, a una función bidimensional de intensidad realitosa denotada por  $f(x,y)$ , donde el valor o amplitud de  $f$  en las coordenadas espaciales  $(x,y)$  es la intensidad o brillo de la imagen en tal punto. Ya que la luz es de forma de energía,  $f(x,y)$  debe de ser no negativa y finita esto es,

$$0 \leq f(x,y) < \infty \quad (1.1)$$

La naturaleza básica de  $f(x,y)$  puede ser considerada como caracterizada por dos componentes. Un componente es la cantidad de luz incidente sobre la escena observada, mientras que la otra es la cantidad de luz reflejada por los objetos en la escena. Estos componentes son apropiadamente llamados los componentes de iluminación y de reflectancia, y son dictados por  $i(x,y)$  y  $r(x,y)$ , respectivamente. Las funciones  $i(x,y)$  y  $r(x,y)$  se combinan como un producto para formar  $f(x,y)$ :

$$f(x,y) = i(x,y) \cdot r(x,y) \quad (1.2)$$

donde

$$0 < i(x,y) < \infty \quad (I.3)$$

y

$$0 < r(x,y) < 1 \quad (I.4)$$

La ecuación (I.4) indica el hecho de que la reflectancia está limitada por 0 (absorción total) y 1 (reflectancia total). La naturaleza de  $i(x,y)$  está determinada por la fuente de luz, mientras que  $r(x,y)$  está determinada por las características de los objetos en una escena. Los valores dados en la ecuación (I.3) y (I.4) son límites teóricos.

La intensidad de una imagen monocromática  $f$  en las coordenadas  $(x,y)$  se denominará nivel de gris ( $l$ ) de la imagen en el punto correspondiente. De las ecuaciones (I.1) a la (I.4), se tiene,

$$L_{\min} \leq l \leq L_{\max} \quad (I.5)$$

donde

$$L_{\min} = i_{\min} \cdot r_{\min} \quad \text{y} \\ L_{\max} = i_{\max} \cdot r_{\max}$$

En teoría, el único requisito sobre  $L_{\min}$  es que sea positivo, y sobre  $L_{\max}$  que sea finito; en la práctica, son límites que dependen del ambiente visual.

El intervalo  $[L_{\min}, L_{\max}]$  es llamado escala de cuantificación o escala de gris. Es práctica común cambiar este intervalo numéricamente al intervalo  $[0,1]$ , donde 0 es considerado negro y 1-0-1 considerado blanco en la escala. Todos los valores intermedios son tonos de gris que varían uniformemente de negro a blanco.

## I.5 MUESTREO Y CUANTIFICACION UNIFORME

Para adecuar en forma apropiada para procesar digital, una imagen continua  $f(x,y)$  debe de ser digitalizada tanto espacialmente como en amplitud [10], [11], [12], [13]. La digitalización de coordenadas espaciales  $(x,y)$  será referida como muestreo de imagen, mientras que la digitalización de amplitud será llamada cuantificación de niveles de gris (para imágenes monocromáticas).

Una imagen continua  $f(x,y)$  es aproximada por muestras igualmente espaciadas dispuestas en la forma de un arreglo o trama de  $N \times M$  (siendo en general  $M \approx N$ ), donde cada elemento del arreglo es una cantidad discreta. A este arreglo se le conoce comúnmente como Imagen Digital, y a cada uno de sus elementos como elemento de imagen o píxel.

El proceso de digitalización requiere se tome una decisión sobre el valor de  $N$  es decir, número de píxels por línea, también como del número de niveles de gris adaptados para cada píxel, es decir número de bits por píxel. Es práctica común en el Proceso Digital de Imágenes establecer estas cantidades a potencias de dos:

$$N = 2^k \quad \text{resolución espacial cuadrada.} \quad (I.6)$$

$$L = 2^m \quad \text{niveles de cuantificación} \quad (I.7)$$

(0 negro, 1, ..., L-1 blanco)  
escala de gris o número de matices representables con  $m$  bits/píxel.

Usando las ecuaciones anteriores, el número de bits requeridos para almacenar una imagen digital está dado por:

$$\text{número de bits} = N \times N \times m, \quad \text{si } N = M \quad (I.8)$$

por imagen.

Generalmente es más práctico tener el conteo de bytes computacional llenar completamente un byte a esta imagen traspase de pixels de un byte con el siguiente. Entonces si un byte está compuesto por 8 bits se tiene que:

$$\text{número de bytes} = \frac{N \times N \times m}{8} \quad \text{siendo } m \leq 8 \quad (I.9)$$

por imagen  $v$   $v = N \times M$

Lo cual implica que si  $N = M = 256$  y  $m = 8$  una imagen digital monocromática requiere de 65,536 bytes de otra forma, si la información de un píxel está contenida en más de un byte, la cantidad de información estará dada por:

$$\text{número de bytes} = \frac{N \times N \times m}{8} \quad \text{con } N \times M = v \quad (I.10)$$

por imagen  $v$   $v = N \times M$

Una imagen digital es entonces una aproximación de una imagen continua, y es relativo el número de muestras y niveles de cuantificación que se requieren para obtener una buena aproximación. La resolución, es decir, el grado de detalle discernible de una imagen es fuertemente dependiente tanto de  $N$ , resolución espacial en pixels por línea, como de  $m$ , precisión en bits por pixel; así si,

$N$  tiende a  $\infty$

y

$m$  tiende a  $\infty$

entonces la

imagen digital tiende a la imagen analógica  
(discreta) (continua)

Sin embargo, claramente el volumen de información y los requerimientos computacionales se incrementan rápidamente en función del incremento de  $N$  y  $m$ , de forma exponencial.

## Conclusión I

Una imagen que ha sido reducida a un conjunto de valores binarios puede ser almacenada o transmitida directamente a una computadora [56], [75], [80], [87], [91], [92]. Los datos pueden entonces ser procesados para obtener un nuevo conjunto de valores digitales, los cuales representan una imagen procesada.

El desarrollo de las computadoras, su incremento en potencia y sofisticación, estimulan a menudo las comparaciones entre éstas y el cerebro humano; y estas comparaciones están cada vez más fundamentadas conforme las computadoras son aplicadas a tareas formalmente asociadas con actividades esencialmente humanas.

Aunque esta analogía es arbitraria, al nivel de sus componentes físicos, las diferencias son grandes, las neuronas células nerviosas de estructura delicada, limitadas por una compleja membrana y comprimidas en un medio de células soporte que controlan un complejo y probablemente variable ambiente químico; son muy diferentes de los cables y cristales de material semiconductor sobre los cuales las computadoras están basadas.

En lo que respecta a la organización física, las diferencias también son amplias, las conexiones entre neuronas son muy numerosas, cualquier neurona puede recibir miles de entradas y éstas están distribuidas tridimensionalmente. En una computadora de arquitectura secuencial las conexiones que unen a los componentes están limitadas por la tecnología de estado sólido actual a un relativo número reducido dispuesto de forma más o menos bidimensional [39], [45], [46], [48], [70], [80].

En la transmisión de señales, las diferencias son nuevamente grandes. Los pulsos eléctricos binarios de la computadora son reflejados hasta cierto punto en señales todo o nada conducidas a lo largo de pistas, pero en su lugar, el cerebro emplea señales eléctricas graduadas, substancias químicas y el transporte de iones mensajeros.

Por lo que toca a la organización temporal, las diferencias son inmensas, las computadoras clásicas procesan información secuencialmente pero a una velocidad muy rápida, el curso de tiempo de su operación está gobernada por un reloj. El cerebro funciona de forma más lenta pero analiza información a lo largo de millones de canales de manera concurrente, sin necesidad de sincronía.

¿Cómo es que el cerebro y la computadora pueden asimilarse?

Claramente debe de ser a un nivel en el cual cualquier par de entes puedan ser comparados. Uno puede comparar las tareas que ellos realizan; si la afirmación, de que la función del cerebro y la computadora se definen como Sistemas de Proceso de Información es cierta, se pueden entonces desarrollar descripciones de las funciones que realizan y serán aplicables indistintamente a cualquiera de ellos. Habrá pues un lenguaje común para tratarlos, el Lenguaje del Proceso de Información.

Sin embargo, está la dominante modalidad sensorial del ser humano, ya que el cerebro no sólo es un Sistema de Proceso de Información sino también un Sistema de Conocimiento, Aprendizaje y Percepción. Si se desea crear robots capaces de desarrollar complejas funciones de manipulación o navegación en un ambiente visual dinámico, es necesario dotarlos con adecuadas habilidades de percepción, la visión artificial entonces no puede abarcar aún la complejidad operacional del Sistema Visual Humano.

El estudio del Sistema Visual Humano no es exclusivamente un problema de Anatomía, es decir, del como las células nerviosas están interconectadas, ni de Fisiología, del como actúan éstas; entonces, la solución al problema requiere de una variedad de auxiliares, incluyendo evidencia Psicofísica, esto es, el conocimiento de que tan bien las personas pueden ver, y de datos Neurofisiológicos, el conocimiento de lo que las neuronas pueden hacer.

Desde la perspectiva del proceso de información, ya sea por el cerebro o la computadora, es un problema de varios niveles. El Dr. David Marr siendo profesor del Massachusetts Institute of Technology MII formuló a finales de la década de los años setenta una Teoría Especial de la Visión, que sirve tanto para la visión natural como para la visión artificial, proponiendo una metodología de acción simple, para analizar y después tratar la información visual. Descomposición que se aplicará en la mayoría de las tareas de sistemas de visión; constituida por tres niveles:

El nivel de computación o cálculo. ¿Cuáles son las funciones computacionales que un sistema visual debe de desarrollar? Dicho de otra forma, ¿De qué cantidad de información puede prescindirse sin inconvenientes para la tarea visual específica?

De esta manera se centra el trabajo en una información filtrada, menos completa que la proporcionada por la imagen original, pero también menos voluminosa. Disminuyendo y simplificando los cálculos que el sistema de visión debe de efectuar para llevar a cabo esta tarea.

El nivel del algoritmo o proceso ¿Qué secuencia de pasos completa la función?

Es el nivel de los métodos, es decir de los procesos que podemos aplicar para extraer de la imagen la información seleccionada en el primer nivel.

El nivel de los componentes físicos ¿Cómo pueden las neuronas o los circuitos electrónicos ejecutar el algoritmo?

El tercer nivel se refiere al equipo con el que se ejecutarán los algoritmos apropiados.

A partir de aquí se puede entender la complejidad de los aspectos para desarrollar Sistemas de Visión Artificial eficaces: además de la dificultad de la elección de la información útil, de la codificación del algoritmo y de la conformación del equipo, hay que llegar a una adecuación de los tres factores antes citados. Encontrar algoritmos apropiados es la parte más crítica de los proyectos que involucran Visión Artificial, por que los algoritmos están restringidos tanto lógicamente como por el equipo disponible.

Finalmente, la gran capacidad de almacenamiento y recuperación de información lograda con las computadoras actuales, de arquitectura paralela o secuencial, no compete con la capacidad del hombre que a través de sus sentidos, especialmente el visual, está describiendo continuamente imágenes que implican volúmenes impresionantes de información, que son de inmediato sintetizadas en forma óptima para su almacenamiento. Este hecho ligado indiscutiblemente a la estructura y funcionamiento esencialmente distinto del cerebro al de las computadoras actuales, permiten inferir el desarrollo futuro de otras arquitecturas de cómputo adecuadas para la solución apropiada de los problemas relacionados con la Visión Artificial.



**CAPITULO II**  
**TRANSFORMACION MATEMATICA DE**  
**IMAGENES**

II.1 INTRODUCCION A LA TRANSFORMADA DE FOURIER	II.2 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER	II.3 TRANSFORMADA DISCRETA BI-DIMENSIONAL DE FOURIER	II.4 PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER	II.5 TRANSFORMADA RAPIDA DE FOURIER
- CONCEPTO	- CONDICIONES PROCESO DIGITAL	- APLICACION DIP	- RELACION DIF	- MODIFICACION
<ul style="list-style-type: none"> <li>• teorema fundamental</li> <li>• concepto fisico-matematico</li> <li>• dominio espacio frecuencia (caso DIP)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• transformada continua de Fourier</li> <li>• transformada discreta de Fourier (unidimensional)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• adaptacion a DIP, concepto (caracteristicas)</li> <li>• justificacion matematica de transformacion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• separabilidad</li> <li>• traslacion</li> <li>• periodicidad y simetria</li> <li>• conjugada</li> <li>• distributividad y escalamiento</li> <li>• rotacion</li> <li>• valor promedio</li> <li>• laplaciano</li> <li>• convolucion y correlacion</li> <li>• muestreo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• principios del algoritmo,</li> <li>• numero de operaciones,</li> <li>• algoritmo.</li> <li>• FFT inversa,</li> <li>• implementacion,</li> </ul>
ecuaciones: II.1.....II.13	ecuaciones: II.14.....II.16 figuras II.4	ecuaciones: II.17.....II.24	ecuaciones: II.25.....II.72b figuras: II.8.....II.P	ecuaciones: II.73.....II.98
paginas [31-33]	paginas [34-35]	paginas [36-37]	paginas [38-63]	paginas [64-69]

**CONCLUSION II**

## II.1 INTRODUCCION A LA TRANSFORMADA DE FOURIER

### Concepto de la Transformada de Fourier

Cuando una imagen está en forma digital, sus diferentes aspectos pueden ser manipulados matemáticamente para cambiar, resaltar o analizar sus características. La mayoría del proceso digital está basado en algoritmos matemáticos que simulan a grandes rasgos lo que el Sistema Visual Humano hace cuando examina las imágenes; esto es, ver objetos, formas, colores, texturas, etcétera.

Dos procedimientos matemáticos relacionados que operan sobre toda la imagen son el Análisis de Fourier y la Convulsión Espacial. El Sistema Visual Humano parece hacer algo semejante a ambos análisis y cada uno es usado extensivamente en el proceso automático de imágenes. El Análisis de Fourier es una técnica numérica que como el cerebro, trata simultáneamente la imagen completa de tal forma que extrae patrones comunes de luz variable en su extensión. El resultado del análisis es un conjunto de nuevos valores que representan las contribuciones relativas a diferentes tasas de cambio en la extensión espacial de la imagen. Estas tasas de cambio son denominadas frecuencias espaciales. Una imagen que solo posee variaciones graduales de luz en su extensión, por ejemplo, dunas de arena en el desierto, estaría principalmente constituida por componentes de baja frecuencia. Por otra parte, una imagen con muchos objetos de diferentes luminencias, por ejemplo, células en el microscopio, tendría una amplia variedad de componentes de Fourier de alta frecuencia.

Sucede entonces, que cualquier imagen puede ser matemáticamente concebida como una colección de frecuencias espaciales sinusoidales. La cantidad de una particular frecuencia espacial que contribuye en una imagen está representada por su amplitud, y el lugar en la imagen en la que hace su máxima contribución está representada por lo fase en relación a las otras frecuencias espaciales. El Análisis de Fourier provee entonces una representación de frecuencia por amplitud por fase de una imagen. Este análisis resulta en la compilación de tanto las generalidades de la imagen como de los detalles en ésta:

Sea  $f(x)$  una función continua de variable real  $x$ . La transformada de Fourier [2], [21], [22], [24], de  $f(x)$ , denotada por  $F[f(x)]$ , está definida, por la ecuación

$$F[f(x)] = F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-j2\pi ux} dx \quad (II.1)$$

donde  $j = \sqrt{-1}$  ( $j$  sirve como una etiqueta que identifica al componente asociado con la segunda posición del par ordenado de la fórmula de Euler II.8). Dado  $F(u)$ ,  $f(x)$  puede ser obtenida usando la transformada inversa de Fourier

$$F^{-1}\{F(u)\} = f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u) e^{j2\pi ux} du \quad (II.2)$$

Las ecuaciones (II.1) y (II.2), las cuales son llamadas par de transformadas de Fourier, se demuestra que existen si  $f(x)$  es continua e integrable y  $F(u)$  es integrable [11], [74].

Considerando  $f(x)$  una función real; la transformada de Fourier de una función real es sin embargo, generalmente compleja [50], esto es,

$$F(u) = R(u) + j I(u) \quad (II.3)$$

donde  $R(u)$  y  $I(u)$  son, respectivamente, los componentes real e imaginario de  $F(u)$ . A menudo es conveniente expresar (II.3) en forma exponencial:

$$F(u) = A(u) e^{j\phi(u)} \quad (II.4)$$

donde

$$A(u) = [R^2(u) + I^2(u)]^{1/2} \quad (II.5)$$

y

$$\phi(u) = \tan^{-1} \frac{I(u)}{R(u)} \quad (II.6)$$

La magnitud de la función  $A(u)$  es llamada espectro de Fourier de  $f(x)$  y  $\psi(u)$  es el ángulo de fase. El cuadrado del espectro,

$$A^2(u) = R^2(u) + I^2(u) \quad (II.7)$$

es comunmente referido como espectro de energía de  $f(x)$ .

La variable  $u$  que aparece en la transformada de Fourier es llamada la variable de frecuencia. Este nombre surge del hecho que, utilizando la fórmula de Euler, el término exponencial  $e^{-j2\pi ux}$  puede ser expresado en la forma:

$$e^{-j2\pi ux} = \cos(2\pi ux) - j \sin(2\pi ux) \quad (II.8)$$

Si la integral (II.1) es representada como una suma finita de términos discretos, entonces [24]  $F(u)$  está compuesta de una suma infinita de términos de seno y coseno, y que cada valor de  $u$  determina la frecuencia de su correspondiente par trigonométrico coseno seno.

La transformada de Fourier puede ser extendida a una función  $f(x,y)$  de dos variables [89]. Si  $f(x,y)$  es continua e integrable, y  $F(u,v)$  es integrable, se tiene:

$$F\{f(x,y)\} = F(u,v) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x,y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (II.9)$$

y

$$F^{-1}\{F(u,v)\} = f(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(u,v) e^{j2\pi(ux+vy)} du dv \quad (II.10)$$

donde  $u$  y  $v$  son las variables de frecuencia.

Como en el caso unidimensional, el espectro de Fourier, el ángulo de fase y el espectro de energía están respectivamente dados por las relaciones:

$$A(u,v) = [ R^2(u,v) + I^2(u,v) ]^{1/2} \quad (II.11)$$

$$\psi(u,v) = \tan^{-1} \frac{I(u,v)}{R(u,v)} \quad (II.12)$$

y

$$A^2(u,v) = R^2(u,v) + I^2(u,v) \quad (II.13)$$

## II.2 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

En análisis matemático y en teoría científica es natural, o quizás convencional, pensar en términos de funciones definidas sobre una variable tomando valores de la continuidad. La continuidad es usualmente infinita en extensión y la variable es muy a menudo el tiempo, no obstante el problema específico de imágenes como función bidimensional que varía espacialmente, esta variable es el espacio.

Sin embargo, en análisis numérico o análisis de datos usualmente se trata con conjuntos de números ordenados, funciones de variable discreta, conocidas como secuencias. Más aún, estos conjuntos o secuencias son finitas en extensión. La discontinuidad y la finitud son impuestas por consideraciones prácticas de computo y por limitaciones prácticas en la duración y frecuencia en la observación experimental.

Dado que es necesario manipular tales secuencias, sea  $f(x)$  una secuencia con  $x=0,1,\dots,N-1$  para definir una transformación particular ortogonal la cual toma la secuencia  $f(x)$  en otra secuencia  $F(u)$  de la misma longitud que  $f(x)$  la cual describe la estructura de la frecuencia de  $f(x)$ . Esta transformación es llamada Transformada Finita de Fourier: [1], [24], [50], [89].

Sea una función continua  $f(x)$  es discretizada en una secuencia  $\{f(x_0), f(x_0+\delta_x), f(x_0+2\delta_x), \dots, f(x_0+(N-1)\delta_x)\}$  formando  $N$  muestras separadas  $\delta_x$  unidades como se muestra en la figura II.A:

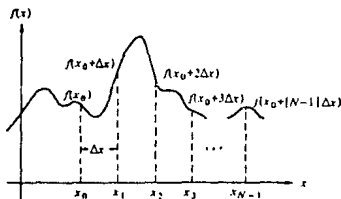


figura II.A, Muestras de una función continua.

entonces  $f(x):f(x_0+\delta_x)$  donde  $x$  asume los valores discretos  $0,1,2,\dots,N-1$ . En otras palabras, la secuencia  $\{f(0), f(1), f(2), \dots, f(N-1)\}$  será usada para denotar cualquier  $N$  muestras uniformemente espaciadas de una función continua correspondiente.

Se tiene entonces que el par discreto de transformadas de Fourier que se aplica a funciones muestreadas está dado por:

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) e^{-j2\pi ux/N} \quad (II.14)$$

$u=0, 1, 2, \dots, N-1$

y

$$f(x) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} F(u) e^{j2\pi ux/N} \quad (II.15)$$

$x=0, 1, 2, \dots, N-1$

Los valores  $u=0, 1, 2, \dots, N-1$  en la transformada discreta de Fourier dados en la ecuación (II.14) corresponden a las muestras de la transformada continua en los valores  $0, \delta_u, 2\delta_u, \dots, (N-1)\delta_u$ . En otras palabras, estableciendo  $f(u)$  que representa  $F(u\delta_u)$ . Esta notación es similar a la usada para la función discreta  $f(x)$ , con excepción que las muestras de  $F(u)$  inician en el origen de la frecuencia  $\omega$ .

Puede demostrarse [50] que  $\delta_u$  y  $\delta_x$  están relacionados por la expresión

$$\delta_u = \frac{1}{\delta_x} \quad (II.16)$$

### II.3 TRANSFORMADA DISCRETA BIDIMENSIONAL DE FOURIER

El caso de dos variables, el par de transformadas discretas de Fourier [74], [62], [76], [99], [98], [96] está dado por las ecuaciones

$$F(u,v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) e^{-j2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (II.17)$$

$u=0,1,2,\dots,M-1$   
 $v=0,1,2,\dots,N-1$

y

$$f(x,y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u,v) e^{j2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (II.18)$$

$x=0,1,2,\dots,M-1$   
 $y=0,1,2,\dots,N-1$

El muestreo de una función continua es ahora un arreglo bidimensional con divisiones de  $\delta_x$  y  $\delta_y$  de ancho en el eje  $x$  y  $y$  respectivamente. Como en el caso unidimensional, la función discreta  $f(x,y)$  representa muestras de la función  $f(x_0+\delta_x, y_0+\delta_y)$  para  $x=0,1,2,\dots,M-1$  y  $y=0,1,2,\dots,N-1$ . Comentarios similares se aplican para  $F(u,v)$ .

Los incrementos de muestreo en los dominios espacial y frecuencial están relacionados por

$$\delta u = \frac{1}{M\delta_x} \quad (II.19)$$

y

$$\delta v = \frac{1}{N\delta_y} \quad (II.20)$$

Cuando las imágenes son muestreadas en un arreglo cuadrado se tiene  $M=N$  y las ecuaciones (II.17) y (II.18) se simplifican a:

$$F(u,v) = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) e^{-j2\pi(ux+vy)/N} \quad (II.21)$$

$u,v=0,1,2,\dots,N-1$

y

$$f(x,y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u,v) e^{j2\pi(ux+vy)/N} \quad (II.22)$$

$x,y=0,1,2,\dots,N-1$

En la práctica, las imágenes son típicamente digitalizadas en arreglos cuadrados, tal que se usarán el par de transformadas dadas en las ecuaciones (II.21) y (II.22) para la explicación formal. La fórmula dada en las ecuaciones (II.17) y (II.18) será usada de vez en vez en situaciones donde es importante expandir a la generalidad del tamaño de la imagen.

El espectro, el ángulo de fase y el espectro de energía de Fourier de funciones discretas uni y bidimensionales están también expresados por las ecuaciones (II.5) a la (II.7) y (II.11) a la (II.13) respectivamente. La única diferencia es que las variables independientes son discretas.

Además a diferencia del caso continuo, no es necesario preocuparse acerca de la existencia de la transformada discreta ya que  $F(u)$  y  $F(u,v)$  siempre existen en el caso discreto [24], [50], [74], [89]. En el caso unidimensional por ejemplo, se puede demostrar por substitución directa de la ecuación (II.15) en (II.14) que

$$\begin{aligned} F(u) &= \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \left[ \sum_{r=0}^{N-1} F(r) e^{j2\pi rx/N} e^{-j2\pi rx/N} \right] \\ &= \frac{1}{N^2} \sum_{r=0}^{N-1} F(r) \left[ \sum_{x=0}^{N-1} e^{j2\pi rx/N} e^{-j2\pi rx/N} \right] \\ &= F(u) \end{aligned} \quad (II.23)$$

La identidad (II.23) sigue de la condición de ortogonalidad

$$\sum_{x=0}^{N-1} e^{j2\pi rx/N} e^{-j2\pi ux/N} = \begin{cases} N & \text{si } r=u \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases} \quad (II.24)$$

(notar que el cambio de variable  $u$  a  $r$  fue hecho para clarificar la notación)

La substitución de la ecuación (II.14) en (II.15) también establecería una identidad sobre  $f(x)$ , indicando que el par de transformadas de Fourier siempre existe.

Un argumento similar es válido para el par de transformadas discretas de Fourier bidimensional.



## II.4 PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

A continuación se expone una serie de propiedades [10], [11], [50], [74], [89], [95], [96], de la transformada de Fourier que la hacen aplicable y adaptable a una amplia variedad de problemas en el proceso de señales digitales,

### Separabilidad:

El par de transformadas de Fourier discreta dadas en las ecuaciones (II.21) y (II.22) pueden ser expresadas en formas separables,

$$F(u,v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} e^{j2\pi ux/N} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) e^{-j2\pi vx/N} \quad (II.25)$$

$$u, v = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

y

$$f(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} e^{j2\pi ux/N} \sum_{v=0}^{N-1} F(u,v) e^{j2\pi vx/N} \quad (II.26)$$

$$x, y = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

Para propósitos de Procesamiento Digital de Imágenes, la ventaja principal de la propiedad de separabilidad es que  $F(u,v)$  o  $f(x,y)$  pueden ser obtenidos en dos fases por aplicaciones sucesivas de la transformada unidimensional de Fourier o su inversa. Esto es más claro si (II.25) es expresado en la forma

$$F(u,v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} F(x,v) e^{-j2\pi ux/N} \quad (II.27)$$

donde

$$F(x,v) = N \left[ \frac{1}{N} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) e^{-j2\pi vy/N} \right] \quad (II.28)$$

para cada valor de  $x$ , la expresión dentro de los corchetes es una transformada unidimensional con valores de frecuencia  $v=0, 1, 2, \dots, N-1$ .

Entonces, la función bidimensional  $F(u,v)$  es obtenida tomando la transformada a lo largo de cada renglón de  $f(x,y)$  y multiplicando el resultado por  $N$ . El resultado deseado,  $F(u,v)$ , es entonces obtenido tomando la transformada a lo largo de cada columna de  $F(x,v)$ , como está indicado por la ecuación (II.27), el procedimiento es resumido en la figura II.B:

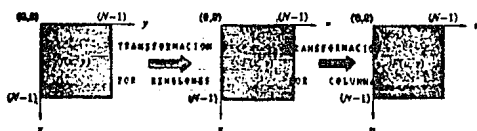


figura II.8. cálculo de la transformada bidimensional como una serie de transformadas unidimensionales.

Se debe notar que los mismos resultados se obtendrían primero tomando la transformada a lo largo de las columnas de  $f(x,y)$  y luego a lo largo de los renglones del resultado. Esto es fácilmente mostrado invirtiendo el orden de las ecuaciones (II.25) y (II.26).

#### Traslación:

La propiedad de traslación del par de transformadas de Fourier están dadas por

$$f(x,y) e^{j2\pi(u_0x+v_0y)/N} \Leftrightarrow F(u-u_0, v-v_0) \quad \text{(II.29)}$$

$$f(x-x_0, y-y_0) \Leftrightarrow F(u,v) e^{-j2\pi(u_0x+v_0y)/N} \quad \text{(II.30)}$$

donde  $\Leftrightarrow$  implica la correspondencia entre la función y su transformada de Fourier y viceversa, como el dado por las ecuaciones (II.9) y (II.10) o (II.21) y (II.22).

La ecuación (II.29) muestra que multiplicando  $f(x,y)$  por el término exponencial indicado y tomando la transformada del producto resulta un corrimiento del origen del plano de la frecuencia al punto  $(u_0, v_0)$ . Similarmente, multiplicando  $F(u,v)$  por el término exponencial mostrado en la ecuación (II.30) y tomando la transformada inversa traslada el origen del plano espacial a  $(x_0, y_0)$ .

En particular el uso de la ecuación (II.29) con  $u_0 = v_0 = N/2$  se tiene que

$$\begin{aligned} e^{j2\pi(u_0x+v_0y)/N} &= e^{j2\pi(x+y)} \\ &= (-1)^{x+y} \end{aligned} \quad \text{(II.31)}$$

$$f(x,y) (-1)^{x+y} \Leftrightarrow F(u-N/2, v-N/2) \quad \text{(II.32)}$$

Entonces, el origen de la transformada de Fourier de  $f(x,y)$  puede ser trasladado al centro de su correspondiente  $N \times N$  cuadrado de frecuencia implementando multiplicación  $f(x,y)$  por  $(-1)^{x+y}$ . En el caso de una variable se suma  $\pm 1$ , multiplicación de  $f(x)$  por el término  $(-1)^x$ . En el **Capítulo III** se expone la importancia de esta propiedad para su aplicación en filtros con simetría radial.

#### Periodicidad y Simetría Conjugada:

La transformada discreta de **Equiarr** y su inversa son periódicas con período  $N$ , esto es,

$$F(u,v) = F(u+N, v) = F(u, v+N) = F(u+N, v+N) \quad (II.33)$$

la validez de esta propiedad puede ser demostrada por sustitución directa de las variables  $(u+N)$  y  $(v+N)$  en la ecuación (II.21). Aunque la ecuación (II.33) implica que  $F(u,v)$  se repite a sí mismo para un número infinito de valores de  $u$  y  $v$ , sólo los  $N$  valores de cada variable en cualquier período se requieren para obtener  $f(x,y)$  a partir de  $F(u,v)$ . En otras palabras, solo la transformada de un sólo período es necesaria para completamente especificar  $F(u,v)$  en el dominio de las frecuencias.

La transformada de **Equiarr** exhibe también simetría conjugada, ya que

$$F(u,v) = F^*(-u,-v) \quad (II.34)$$

o más explícito,

$$|F(u,v)| = |F(-u,-v)| \quad (II.35)$$

Para examinar las implicaciones de las ecuaciones (II.33) y (II.35) en relación al despliegue de la magnitud de la transformada, consideremos el caso unidimensional

$$F(u) = F(u+N)$$

y

$$|F(u)| = |F(-u)|$$

la propiedad de periodicidad indica que  $F(u)$  tiene un período de longitud  $N$ , y la propiedad de simetría muestra que la magnitud de la transformada está centrada con respecto al origen, como se muestra en la figura II.C (a) es claro en esta figura y por los comentarios anteriores que las magnitudes de los valores de la transformada de  $([N/2]+1)$  a  $(N)$  son iguales de los valores de la mitad del período en el lado izquierdo al origen.

A partir de que la transformada discreta de Fourier ha sido formulada para valores de  $\omega$  en el intervalo de  $[0, N\omega_0]$ , se observa que el resultado de esta formulación produce dos simetrías en este intervalo. Los cosenos enteros  $\cos(\omega n)$  que con ellos forma después un período completo, así lo necesitan, es trasladar el origen de la transformada al punto  $\omega = N/2$ , como se muestra en la figura II.C (b). Esto se fácilmente hecho multiplicando  $f(x)$  por  $e^{jN\omega}$  antes de tomar la transformada, como ya indicamos anteriormente con la propiedad de traslación.

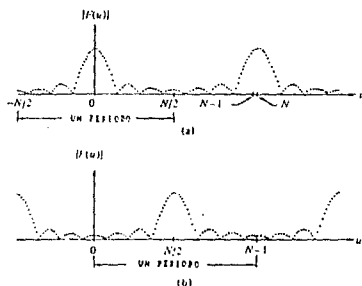


figura II.C. Ilustración de las simetrías de periodicidad de la transformada de Fourier.

- (a) espectro de Fourier con periodicidad evidenciada en el intervalo  $[0, N\omega_0]$   
 (b) espectro trasladado mostrando el período total en el mismo intervalo.

Las mismas observaciones se aplican para la magnitud de la transformada bidimensional de Fourier, con la excepción que los resultados son considerablemente más difíciles de interpretar si el origen de la transformada no es trasladado al punto de la frecuencia  $(N/2, N/2)$ . Esto es mostrado en la figura II.D (a) y (b), donde la última figura, la (a) fue obtenida por la función de traslación de la ecuación (II.32).

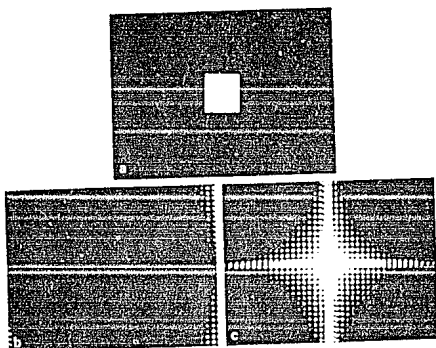


figura 11.0. (a) imagen original. (b) transformada de Fourier sin muestreo. (c) multiplicación de la imagen original por la función de transferencia del sistema.

### Distributividad y Escalamiento

Directamente de la definición del par de transformada de Fourier,

$$F[f_1(x,y) + f_2(x,y)] \text{ es igual a } F\{f_1(x,y)\} + F\{f_2(x,y)\} \quad (11.36)$$

y en general que,

$$F\{f_1(x,y) \cdot f_2(x,y)\} \text{ es diferente a } F\{f_1(x,y)\} \cdot F\{f_2(x,y)\} \quad (11.37)$$

Es decir, no existe la propiedad de distributividad en el dominio de la imagen con respecto a la multiplicación.

Es también fácil mostrar que para dos imágenes  $u(x,y)$  y  $v(x,y)$ ,

$$af(x,y) + bv(x,y) \quad (11.38)$$

$$F(ax,by) = \frac{1}{|ab|} F(u/a, v/b) \quad (11.39)$$

Rotación

Si se introducen coordenadas rotadas,

$$x = \rho \cos \theta \quad y = \rho \sin \theta$$

$$x' = \rho' \cos \theta' \quad y' = \rho' \sin \theta'$$

entonces  $f(x,y) = F(\rho,\theta)$  se hacen  $f'(x',y') = F(\rho',\theta')$ , respectivamente. Esto puede ser demostrado por substitución directa en cualquiera de los pares de la transformada directa de Fourier, tal que

$$f(x,y) = \int \int F(\omega_1, \omega_2) e^{j(\omega_1 x + \omega_2 y)} d\omega_1 d\omega_2 \quad (II.40)$$

En otras palabras, si  $f(x,y)$  es rotado con un ángulo de  $\theta'$ , entonces  $f'(x',y')$  es rotado en el mismo ángulo. Challengante, notar  $F(\omega_1, \omega_2)$  es una que  $f(x,y)$  es rotado por el mismo ángulo, propiedad ilustrada en la figura II.E

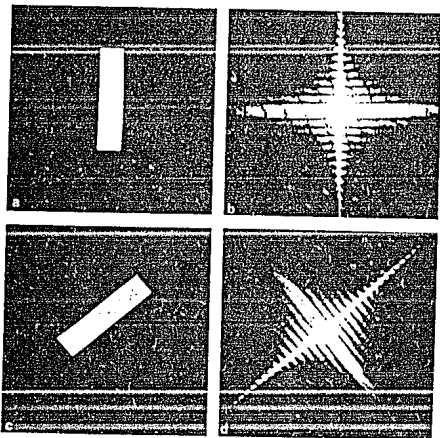


figura II.E. propiedades rotacionales de la transformada de Fourier. (a) imagen simple, (b) espectro correspondiente, (c) imagen rotada (d) espectro resultante.

## Valor Promedio

Una definición ampliamente usada del valor promedio de una función bidimensional discreta está dada por la expresión

$$\bar{f}(x,y) = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \quad (11.41)$$

La sustitución de  $ux=0$  en la ecuación (11.21) produce

$$f(0,0) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \quad (11.42)$$

se observa entonces que  $\bar{f}(x,y)$  es la relación de Fourier transformada de Fourier de  $f(x,y)$  por la ecuación

$$\bar{f}(x,y) = \frac{1}{N} f(0,0) \quad (11.43)$$

## Convolución y Correlación

En esta sección se consideraran dos relaciones de Fourier las cuales constituyen la unión básica entre los dominios espacial y frecuencial. Estas relaciones, denominadas convolución y correlación, son de fundamental importancia en el desarrollo de un firme entendimiento de las técnicas de proceso de imágenes basadas en la transformada de Fourier [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]. Para clarificar los conceptos involucrados, se iniciará la discusión considerando el concepto de convolución unidimensional con argumentos continuos, el desarrollo se extenderá al caso discreto y finalmente a los casos bidimensional continuo y discreto. La misma convención es seguida en el desarrollo del concepto de correlación.

### Convolución

La convolución de dos funciones  $f(x)$  y  $g(x)$ , denotada por  $f(x)*g(x)$ , está definida por la integral

$$f(x)*g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\sigma)g(x-\sigma) d\sigma \quad (11.46)$$

donde  $\sigma$  es una variable ficticia de integración. Ya que la mecánica de la integral de convolución no es particularmente fácil de visualizar, se ilustrará gráficamente la ecuación (11.46) con tres ejemplos simples.

**Ejemplo 1**

El primer ejemplo muestra la convolución de las funciones  $f(x)$  y  $g(x)$  definidas en las figuras II.E (a) y (b), respectivamente. Antes de llevar a cabo la integración, es necesario formar la función  $g(x-a)$ . Esto es mostrado en dos pasos en la figura II.E (c) y (d), notando que esta operación es simplemente un desplazamiento  $g(x)$  con respecto al origen para dar  $g(-x)$  y posteriormente desplazar esta función por  $x$ . Entonces, para cualquier valor de  $x$ , se hace el producto de  $f(x)$  por el correspondiente  $g(x-a)$  y la integración de  $f(x)g(x-a)$ , dicho producto es la región sombreada en la figura II.E (e). Esta figura es válida para el dominio de  $x$  en  $[0,1]$ , ya que el producto se anula para valores  $a$  fuera del intervalo  $[0,x]$ , se tiene que la convolución  $f(x)*g(x) = x/2$ , que es el Área sombreada en la figura II.E (f). En otro caso, para  $x$  en el intervalo  $[1,2]$  la figura II.E (f) ilustra la convolución respectiva, dada por  $f(x)*g(x) = (1-x)/2$ , notando nuevamente que  $f(x)g(x-a)$  se anulan para valores fuera del intervalo  $[0,2]$ , así se tiene:

$$f(x)*g(x) = \begin{cases} x/2 & 0 \leq x \leq 1 \\ 1-x/2 & 1 \leq x \leq 2 \\ 0 & \text{en cualquier otro rango} \end{cases}$$

el resultado es mostrado en la figura II.E (g).

□

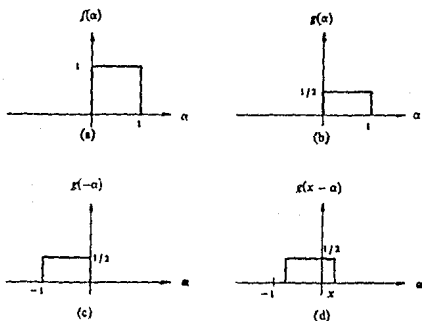


figura II.Ea. Ilustración gráfica del concepto de convolución.



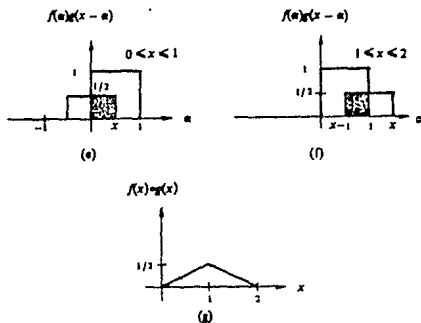


figura 11.6. ilustración gráfica de convolución. las áreas sombreadas indican las regiones donde el producto es diferente de cero.

Un aspecto de la ecuación (11.46) la cual será usada posteriormente en esta sección, involucra la convolución de la función  $f(x)$  con la función de pulso  $\delta(x-x_0)$ , la cual esta definida por la relación

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x-x_0) dx = f(x_0) \quad (11.47)$$

la función  $\delta(x-x_0)$  puede visualizarse como una área unitaria en la vecindad infinitesimal de  $x_0$  y siendo cero en cualquier otra parte, esto es,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x-x_0) dx = \int_{-x_0}^{x_0} \delta(x-x_0) dx = 1 \quad (11.48)$$

para la mayoría de los propósitos se puede decir que  $\delta(x-x_0)$  esta localizado en  $x=x_0$ , y que la fuerza del pulso esta determinada por el valor de  $f(x)$  en  $x=x_0$ . Por una instancia, si  $f(x)=A$ , se tiene que  $A\delta(x-x_0)$  es un pulso de fuerza  $A$  localizado en  $x=x_0$ .

Es práctica común representar pulsos gráficamente por una flecha localizada en  $x_0$  y con una amplitud igual a la fuerza del pulso, la figura II.G ilustra la representación  $A\delta(x-x_0)$ .

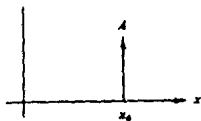


figura II.G. representación gráfica de  $A\delta(x-x_0)$ .

### Ejemplo 2

Un segundo ejemplo de la ecuación (II.46) es el siguiente, suponiendo que la función  $f(x)$  mostrada en la figura II.H (a) es convolucionada con la función  $g(x)=\delta(x+T)+\delta(x)+\delta(x-T)$  mostrada en la figura II.H (b). Al desplazar  $g(x)$  sobre  $f(x)$ , y haciendo uso de las ecuaciones (II.46) y (II.47), se obtiene el resultado mostrado en la figura II.H (c). Notando que en este caso, la convolución hace una copia de  $f(x)$  en la localidad de cada pulso.

□

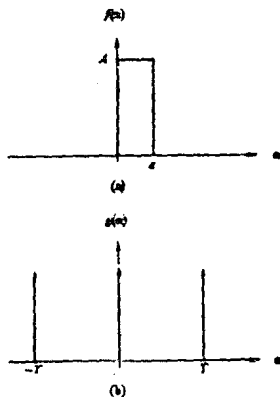


figura II.H. convolución de funciones de pulso.

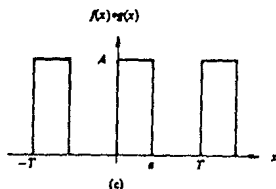


figura II.H. convolución de funciones de pulso.

La importancia del análisis de convolución en el dominio frecuencial recae en el hecho de que  $f(x)*g(x)$  y  $F(u)G(u)$  constituyen el par de transformadas de Fourier. En otras palabras, si  $f(x)$  tiene la transformada de Fourier  $F(u)$  y  $g(x)$  tiene la transformada de Fourier  $G(u)$ , entonces  $f(x)*g(x)$  tienen la transformada de Fourier  $F(u)G(u)$ . Este resultado es formalmente establecido como,

$$f(x)*g(x) \Leftrightarrow F(u)G(u) \quad (II.49)$$

indica que la convolución en el dominio de  $x$  puede ser también obtenida tomando la inversa de la transformada de Fourier del producto  $F(u)G(u)$ .

Un resultado análogo es la convolución en el dominio de la frecuencia reducida a la multiplicación en el dominio de  $x$ ; esto es,

$$f(x)g(x) \Leftrightarrow F(u)*G(u) \quad (II.50)$$

estos dos resultados son comúnmente referidos como el **Teorema de Convolución**.

Suponiendo que en lugar de que  $f(x)$  y  $g(x)$  sean funciones continuas, son discretizadas en arreglos de muestras de tamaño  $A$  y  $B$  respectivamente:

$$\{f(0), f(1), f(2), \dots, f(A-1)\}$$

y

$$\{g(0), g(1), g(2), \dots, g(B-1)\}$$

como se ha mencionado anteriormente, la transformada discreta de Fourier y su inversa son funciones periódicas.

Para formular un teorema de convolución discreta que sea consistente con la propiedad de periodicidad se asume que las funciones discretas  $f(x)$  y  $g(x)$  son periódicas con periodo  $M$ . La convolución resultante será entonces periódica con el mismo periodo, el problema es como seleccionar un valor para  $M$ .

Se puede demostrar que a menos que se elija,

$$M \geq A + B - 1 \quad (\text{II.51})$$

los períodos individuales de convolución se traslaparán; este traslape es comúnmente referido como error de envolvimiento (wraparound error). Si  $M=A+B-1$ , los períodos serán adyacentes; si  $M>A+B-1$ , los períodos estarán espaciados por una separación igual a la diferencia entre  $M$  y  $A+B-1$ .

Ya que el período asumido debe de ser mayor que  $A$  ó  $B$ , la longitud de las secuencias muestreadas debe de ser incrementada tal que ambos sean de longitud  $M$ . Esto puede ser hecho adicionando ceros a las muestras dadas para formar las siguientes secuencias extendidas:

$$f_e(x) = \begin{cases} f(x) & 0 \leq x \leq A-1 \\ 0 & A \leq x \leq M-1 \end{cases}$$

y

$$g_e(x) = \begin{cases} g(x) & 0 \leq x \leq B-1 \\ 0 & B \leq x \leq M-1 \end{cases}$$

Basado en esto, la convolución discreta de  $f_e(x)$  y  $g_e(x)$  se define por la expresión,

$$f_e(x) * g_e(x) = \sum_{m=0}^{M-1} f_e(m) g_e(x-m) \quad (\text{II.52})$$

$$x=0,1,2,\dots,M-1$$

La función de convolución es discreta y es periódica; es un arreglo de longitud  $M$  con los valores  $x=0,1,2,\dots,M-1$  describiendo un período total de  $f_e(x)*g_e(x)$ .

Los mecanismos de convolución discreta son básicamente los mismos que los de la convolución continua. Las únicas diferencias son los desplazamientos que toman lugar en incrementos discretos correspondientes a la separación entre las muestras, y la integración es reemplazada por la suma. Similarmente, las ecuaciones (II.49) y (II.50) también son válidas en el caso discreto donde, para evitar error de traslape, se usa  $f_e(x)$  y su transformada. Las variables discretas  $x$  y  $y$  asumen valores en el rango  $0,1,2,\dots,M-1$ .

### Ejemplo 3

Las precedentes consideraciones son ilustradas gráficamente en la figura II.1 para el caso de convolución continua y discreta. Los diagramas del caso discreto muestran  $A$  muestras para  $f(x)$  y  $g(x)$  en el intervalo  $[0,1]$ , también un periodo asumido de  $M=A+B-1=2A-1$ . Notando, que la función de convolución es periódica con  $M$  muestras y que a partir de que  $M>2A-1$ , los periodos son adyacentes. Elegir  $M>2A-1$  produciría una separación más amplia entre éstos.

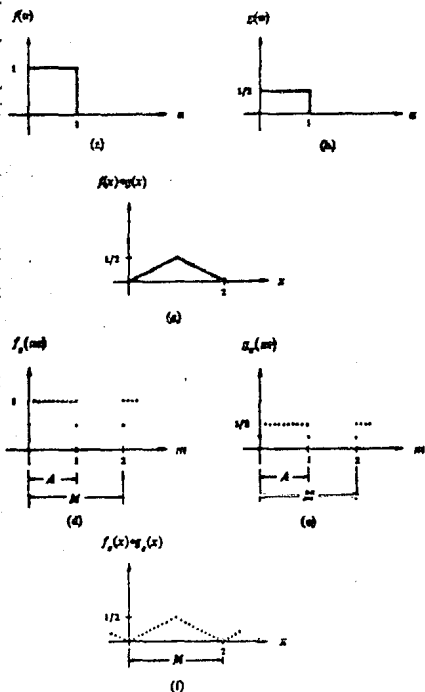


figura II.1. comparación entre convolución continua y discreta.

La convolución bidimensional es análoga en forma a la ecuación (II.46). Entonces, para dos funciones  $f(x,y)$  y  $g(x,y)$ , se tiene que

$$f(x,y)*g(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\alpha,\beta) g(x-\alpha,y-\beta) d\alpha d\beta \quad \text{(II.53)}$$

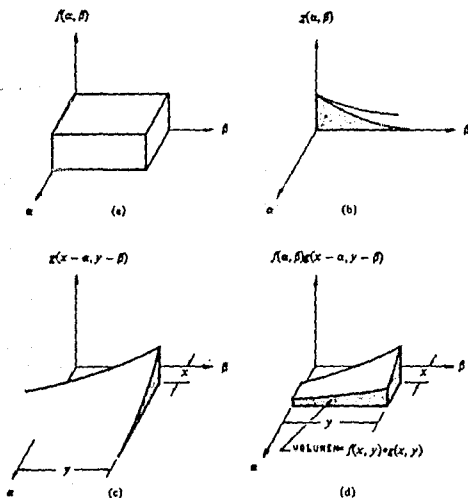
El teorema de convolución en dos dimensiones entonces está dado por las relaciones

$$f(x,y) * g(x,y) \Leftrightarrow F(u,v) G(u,v) \quad \text{(II.54)}$$

y

$$f(x,y) g(x,y) \Leftrightarrow F(u,v) * G(u,v) \quad \text{(II.55)}$$

La figura II.1 muestra el plegamiento (a), el desplazamiento (b) y las operaciones de multiplicación (c) requeridas para convolución bidimensional. El resultado de variar los desplazamientos de  $x$  y  $y$ , sería una superficie de convolución bidimensional con una forma dependiente de la naturaleza de las funciones involucradas en el proceso (d):



La convolución bidimensional discreta está formulada estableciendo  $f(x,y)$  y  $g(x,y)$  en arreglos discretos de dimensiones  $A \times B$  y  $C \times D$  respectivamente. Como en el caso unidimensional, los arreglos se deben de asumir periódicos con algún período  $M$  y  $N$  en las direcciones  $x$  y  $y$  respectivamente. El error de envoltimiento o traslape en la convolución de períodos individuales es evitado eligiendo,

$$M \geq A + C - 1 \quad (II.56)$$

$$N \geq B + D - 1 \quad (II.57)$$

Las secuencias periódicas están formadas por extensión de  $f(x,y)$  y  $g(x,y)$  como sigue

$$f_e(x,y) = \begin{cases} f(x,y) & 0 \leq x \leq A-1 \text{ y } 0 \leq y \leq B-1 \\ 0 & A \leq x \leq M-1 \text{ o } B \leq y \leq N-1 \end{cases}$$

$$g_e(x,y) = \begin{cases} g(x,y) & 0 \leq x \leq C-1 \text{ y } 0 \leq y \leq D-1 \\ 0 & C \leq x \leq M-1 \text{ o } D \leq y \leq N-1 \end{cases}$$

La convolución bidimensional de  $f_e(x,y)$  y  $g_e(x,y)$  está dado por la relación

$$f_e(x,y) * g_e(x,y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_e(m,n) g_e(x-m,y-n) \quad (II.58)$$

el arreglo  $M \times N$  dado por esta ecuación es un período de la convolución discreta bidimensional. Si  $M$  y  $N$  son elegidos acorde con las ecuaciones (II.56) y (II.57), este arreglo está garantizado a estar libre de interferencia de otros períodos adyacentes.

Como en el caso unidimensional, el teorema de convolución continua dado por las ecuaciones (II.54) y (II.55) también se aplica al caso discreto con  $u=0,1,2,\dots,M-1$  y  $v=0,1,2,\dots,N-1$ , todos los cálculos involucran las funciones extendidas  $f_e(x,y)$  y  $g_e(x,y)$ .

La potencia técnica del teorema de convolución será mostrada en la sección siguiente cuando sea discutido el teorema de muestreo. Desde el punto de vista computacional, es más eficiente calcular la convolución discreta en el dominio frecuencial en lugar de usar la ecuación (II.58) directamente. El procedimiento es calcular las transformadas de Fourier de  $f_e(x,y)$  y  $g_e(x,y)$  usando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier, las dos transformadas son multiplicadas y la transformada inversa de Fourier del producto, producirá la función de convolución.

Correlación<sup>1</sup>

La correlación de dos funciones continuas  $f(x)$  y  $g(x)$ , denotada por  $f(x) \odot g(x)$ , está definida por la relación

$$f(x) \odot g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(a) g(x+a) da \quad (II.59)$$

Las formas de las ecuaciones (II.46) y (II.59) son similares, la única diferencia está en que la función  $g(x)$  no está trasladada con respecto al origen. Entonces, para desarrollar la correlación simplemente se desliza  $g(x)$  por  $f(x)$  y se integra el producto de  $f(x)$  y  $g(x)$  para cada valor del desplazamiento  $x$ . El procedimiento es ilustrado en la figura II.K

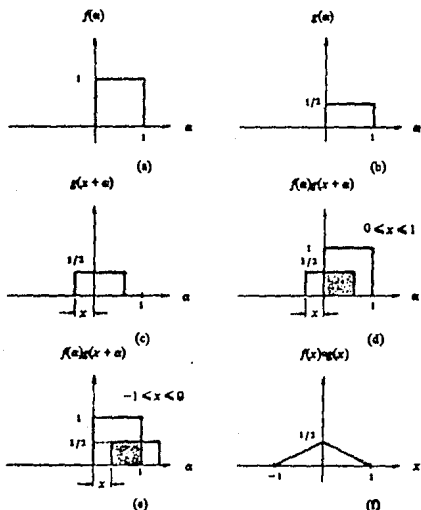


Figura II.K. Ilustración gráfica del concepto de correlación. Las áreas sombreadas indican las regiones donde el producto es diferente de cero.



La relación discreta equivalente a la ecuación (II.59) está definida como

$$f_e(x) \circ g_e(x) = \sum_{m=0}^{M-1} f_e(m) g_e(x+m) \quad (\text{II.60})$$

$$x=0, 1, 2, \dots, M-1$$

el mismo desarrollo hecho para extender  $f_e(x)$  y  $g_e(x)$  de tal forma que la periodicidad de ambas funciones prevalezca, así como la elección de los valores para  $M$  también se aplican para (II.60).

Expresiones similares son válidas para dos dimensiones. Entonces, si  $f(x,y)$  y  $g(x,y)$  son funciones de variables continuas, su correlación está definida como

$$f(x,y) \circ g(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta) g(x+\alpha, y+\beta) d\alpha d\beta \quad (\text{II.61})$$

para el caso discreto se tiene

$$f_e(x,y) \circ g_e(x,y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_e(m,n) g_e(x+m, y+n) \quad (\text{II.62})$$

$$x=0, 1, 2, \dots, M-1$$

$$y=0, 1, 2, \dots, N-1$$

Como en caso de convolución discreta,  $f_e(x,y)$  y  $g_e(x,y)$  son funciones extendidas y  $M$  y  $N$  son elegidas acorde con (II.58) y (II.51) para evitar error de traspase en los periodos individuales de la función correlación.

Se puede demostrar tanto para el caso continuo como el discreto, que el siguiente teorema de correlación es válido,

$$f(x,y) \circ g(x,y) \Leftrightarrow F(u,v) G^*(u,v) \quad (\text{II.63})$$

y

$$f(x,y) g^*(x,y) \Leftrightarrow F(u,v) \circ G(u,v) \quad (\text{II.64})$$

donde  $*$  representa el complejo conjugado. Se subraya que, cuando se trate de variables discretas, todas las funciones son extendidas y periódicas.

Una de las principales aplicaciones de correlación en **RECUPERACIÓN DE IMÁGENES** es en el área de correspondencia de prototipos geométricos, donde el problema es encontrar la más cercana equivalencia entre la imagen dada desconocida y el conjunto de imágenes de origen conocido. Una aproximación a este problema es calcular la correlación entre la imagen desconocida con cada una de las imágenes conocidas. La más cercana equivalencia puede ser hallada seleccionando la imagen que produce la función de correlación con el mayor valor, ya que las correlaciones resultantes son funciones bidimensionales, esto involucra la búsqueda de la más larga amplitud de cada función. Como en el caso discreto de convolución, el cálculo de  $f_2(x,y) \otimes g_2(x,y)$  es más eficientemente obtenido en el dominio de las frecuencias usando la transformada rápida de Fourier para obtener Fourier directa e inversa.

<sup>1</sup> Si  $f(x)$  y  $g(x)$  son iguales, la ecuación (II.59) es denominada función de autocorrelación. Si son diferentes, el término correlación es normalmente empleado.

**Muestreo**

La idea básica del muestreo de imágenes fue introducida en la **sección I.5 del Capítulo I** sobre bases intuitivas. La transformada de Fourier y el **Teorema de Convulsión** proveen las herramientas para un estudio analítico más profundo de este problema. En particular el interés es el de definir el número de muestras que deben de ser tomadas tal que ninguna información se pierda en el proceso de muestreo. Expresado de otra forma, el problema es el de establecer bajo que condiciones de muestreo una imagen continua puede ser aproximada apropiadamente.

**Funciones Unidimensionales**

Consideremos la función mostrada en la **figura II.L (a)**, la cual se supone se extiende de  $-W$  a  $W$ , y supongase que la transformada de Fourier  $f(x)$  es descrita para valores de  $\omega$  fuera del intervalo  $[-W,W]$ . La transformada es mostrada en la **figura II.L (b)**. Una función cuya transformada tiene esta propiedad para cualquier valor finito de  $W$  es llamada una función de banda limitada.

Para obtener una función muestreada de  $f(x)$ , simplemente se multiplica esta función por una función muestra  $s(x)$ , la cual consiste de un tren de pulsos de unidades separadas, como se muestra en la **figura II.L (c)**. A partir del teorema de convulsión, la multiplicación en el dominio de  $x$  es equivalente a la convulsión en el dominio de las frecuencias, se obtiene la transformada de Fourier mostrada en la **figura II.L (f)** para el producto  $s(x)f(x)$ .

Es notorio que la transformada es periódica con período  $1/\delta_x$ , y que las repeticiones individuales de  $F(u)$  pueden traslaparse. En el primer período, por ejemplo, el centro de la región traslapada ocurrirá a  $u=1/2\delta_x$  si la cantidad  $1/2\delta_x$  es menor que  $W$ . Para evitar este problema, entonces, se selecciona el intervalo de muestreo  $\delta_x$  tal que  $1/2\delta_x \geq W$ , ó

$$\delta_x \leq \frac{1}{2W} \quad (II.65)$$

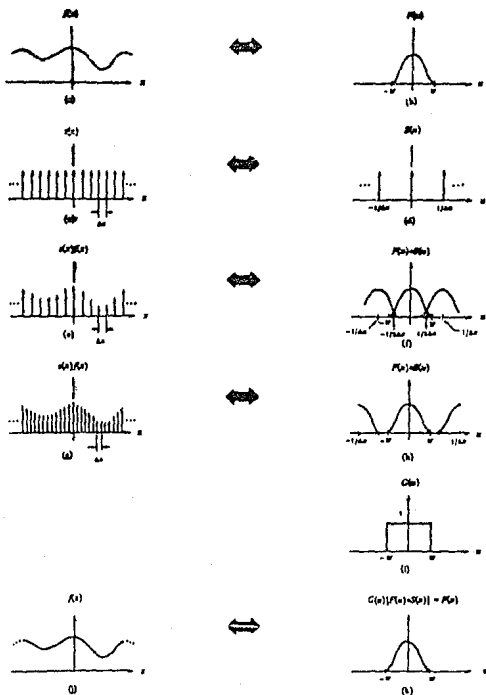


figura II.1. desarrollo grafico de los conceptos de muestreo.

El resultado de decrementar  $\delta_x$  es mostrado en las figuras II.1 (g) y (h). El efecto neto es separar los periodos tal que ningún traslape ocurra. La importancia de esta operación recae en el hecho de que uno multiplique la transformada de la figura II.1 (h) por la función

$$G(u) = \begin{cases} 1 & -W \leq u \leq W \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (\text{II.66})$$

expresada por la figura II.1 (i); es posible aislar  $F(u)$  completamente, como se muestra en la figura II.1 (k). La transformada inversa de Fourier produce entonces la función aproximada a la función original continua  $f(x)$ . El resultado de que una función de banda limitada pueda ser recuperada completamente de muestras cuyo espacio satisface la ecuación (II.65) es conocido como el Teorema de Muestreo conocido como Whittaker Shannon.

Es importante tener en cuenta que toda la información en el dominio de las frecuencias de una función de banda limitada está contenida en el intervalo de  $[-W, W]$ . Si la ecuación (II.65) no se satisface, sin embargo, la transformada en este intervalo está corrompida por contribuciones de periodos adyacentes. Este fenómeno, frecuentemente referido como aliasing, impide la recuperación completa de una función submuestreada.

Los resultados precedentes se aplican a funciones las cuales son ilimitadas en el dominio de  $x$ . A partir de que esto implica un intervalo infinito de muestreo, es interesante examinar el caso práctico donde una función es muestreada únicamente sobre una región finita. Esta situación es mostrada gráficamente en la figura II.2; las partes (a) a la (f) son las mismas que las del caso anterior, con la excepción de que la separación entre las muestras se assume satisficir el teorema de muestreo tal que no hay traslape presente. Un intervalo de muestreo finito  $[0, X]$  puede ser representado matemáticamente multiplicando el resultado muestreado mostrado en la figura II.2 (a) por la función

$$h(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq X \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (\text{II.67})$$

Esta función, comúnmente llamada ventana, y su transformada de Fourier son mostradas en la figura II.2 (g) y (h), respectivamente. Los resultados de la multiplicación son ilustrados en las figuras II.2 (i) y (j). Es importante que el resultado final en el dominio de las frecuencias es obtenido por la convolución de la función  $S(u)F(u)$  con  $H(u)$ , la cual es la transformada de Fourier de la función ventana  $h(x)$ .

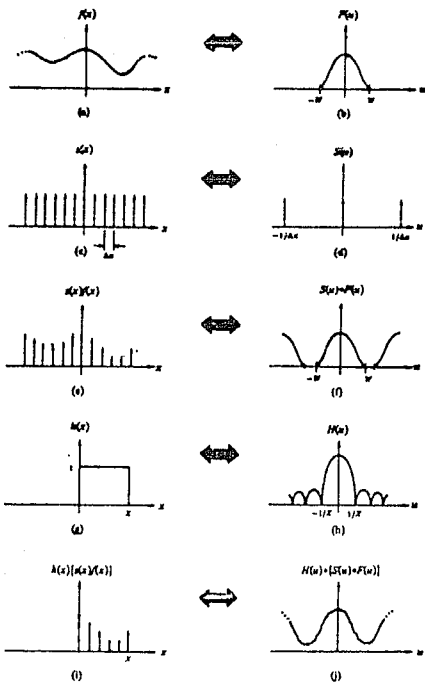


Figura II.8. Ilustración de las relaciones de muestreo y reconstrucción.

A partir de que  $H(u)$  tiene componentes de frecuencia que se extienden a infinito, la convolución de estas funciones introduce una distorsión en el dominio de las frecuencias como la está representada en la figura II.M (i). Entonces, aun si la separación entre las muestras satisface el teorema de muestreo, es generalmente imposible recuperar completamente una función que ha sido muestreada solo sobre una región finita del dominio de  $x$ . Este hecho puede ser apreciado notando que es imposible bajo estas condiciones aislar la transformada de Fourier original. La única excepción a esto es cuando  $f(x)$  es una función de banda limitada y periódica con período igual a  $x$ . En éste caso las corrupciones debidas a  $H(u)$  se cancelan, permitiendo entonces recuperar la función aproximada  $f(x)$  si el teorema de muestreo se satisface. Es importante notar que la función recuperada aún se extiende de  $-\infty$  a  $\infty$  y es diferente de cero fuera del rango en el cual  $h(x)$  es cero. Estas consideraciones implican que ninguna función  $f(x)$  de duración finita puede ser de banda limitada. Contrariamente, una función de banda limitada debe de extenderse de  $-\infty$  a  $\infty$  en el dominio de  $x$ . Este es un resultado práctico importante, ya que establece la limitación fundamental del tratamiento de funciones digitales.

Antes de abandonar la discusión de funciones unidimensionales, se dará una razón alternativa para la periodicidad de la transformada discreta de Fourier. Se inicia notando que, hasta ahora, todos los resultados en el dominio de las frecuencias han sido de naturaleza continua. Para obtener la transformada discreta de Fourier, se muestrea la transformada continua con un tren de pulsos con  $\delta_u$  unidades espaciadas. La situación está representada en la figura II.M, donde se han utilizado las figuras II.M (i) y (j). La notación  $f(x)$  y  $F(u)$  es usada en la figura II.N para facilitar la comparación con la discusión de la sección II.2. Se debe tener en cuenta, que las figuras II.N (a) y (b) son el resultado de la secuencia de operaciones mostrada en la figura II.M.

Como previamente se ha apuntado, el muestreo puede ser representado multiplicando el tren de pulsos y la función de interés. En este caso, se multiplica  $F(u)$  por  $S(u)$  y se obtiene el resultado mostrado en la figura II.N (f). La operación equivalente en el dominio de  $x$  es la convolución, la cual produce la función mostrada en la figura II.N (e). Esta función es periódica, con período  $1/\delta_u$ . Si  $N$  muestras de  $f(x)$  y  $F(u)$  son tomadas y los espacios entre las muestras son seleccionados tal que el período en cada dominio esté cubierto por  $N$  muestras uniformemente espaciadas, tenemos que  $N\delta_x = X$  en el dominio de  $x$  y  $N\delta_u = 1/\delta_x$  en el dominio de las frecuencias. Se sigue de esta discusión que

$$\delta_u = \frac{1}{N\delta_x} \quad (\text{II.68})$$

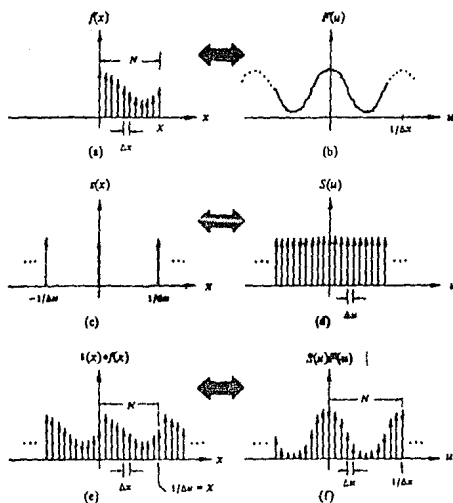


figura 11.11. Ilustración de la transformada discreta de Fourier.

lo cual concuerda con la ecuación (11.16) la elección de este espaciamiento produce la función en la figura 11.11 (e), la cual es periódica con periodo  $1/\delta_u$ . De la ecuación (11.69) se tiene que  $1/\delta_u = \delta_x X$ , lo cual es el intervalo total de la figura 11.11 (a).

### Funciones Bidimensionales

Los conceptos de muestreo desarrollados anteriormente son, después de algunas modificaciones en la notación, directamente aplicables a funciones bidimensionales. El proceso de muestreo para estas funciones puede ser formulado matemáticamente haciendo uso de la función bidimensional de pulso  $\delta(x, y)$  la cual está definida por

$$\iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x-x_0, y-y_0) dx dy = f(x_0, y_0) \quad (11.69)$$

La interpretación de la ecuación (II.69) es sencilla si la dada en conexión con las ecuaciones (II.42) y (II.48). Una función de muestreo bidimensional consiste de un tren de pulsos separados  $\Delta x$  unidades en dirección de  $x$  y  $\Delta y$  unidades en dirección de  $y$ , como se muestra en la figura II.9.

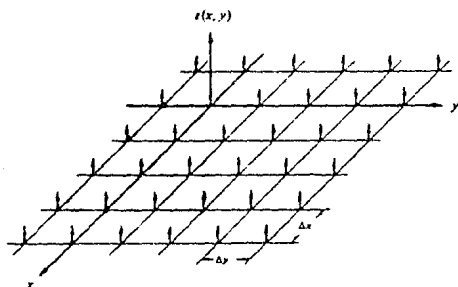


figura II.9. función de muestreo bidimensional.

Dada una función  $f(x,y)$ , donde  $x$  y  $y$  son continuas, una función muestra es obtenida tomando el producto  $s(x,y)f(x,y)$ . La operación equivalente en el dominio de las frecuencias es la convolución de  $S(u,v)$  y  $F(u,v)$ , donde  $S(u,v)$  es un tren de pulsos con separación  $1/\Delta x$  y  $1/\Delta y$  en las direcciones  $u$  y  $v$  respectivamente. Si  $f(x,y)$  es una función de banda limitada, es decir, su transformada de Fourier se anula fuera de alguna región finita  $R$ , el resultado de convolucionar  $S(u,v)$  y  $F(u,v)$  podría parecer como en el caso mostrado en la figura II.10. Notándose que la formación mostrada es periódica en ambas direcciones.

Sea  $2W_u$  y  $2W_v$  las amplitudes en las direcciones  $u$  y  $v$ , respectivamente, del más pequeño rectángulo que completamente abarca la región  $R$ . Entonces de la figura II.10, si  $1/\Delta x > 2W_u$  y  $1/\Delta y > 2W_v$ , es decir, no hay aliasing, uno de los periodos puede ser recuperado completamente si se multiplica  $S(u,v) * F(u,v)$  por la función

$$S(u,v) = \begin{cases} 1 & (u,v) \text{ dentro de uno de los} \\ & \text{rectángulos que comprendan a} \\ & \text{la región } R \\ 0 & \text{cualquier otro sitio} \end{cases} \quad (\text{II.70})$$



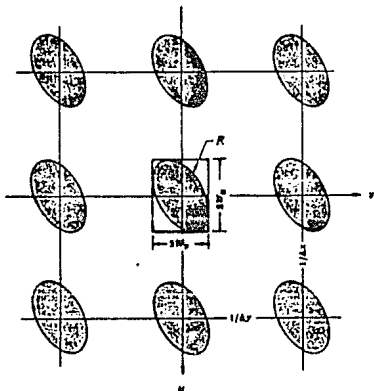


figura II.P. representación en el dominio de las frecuencias de una función bidimensional muestreada, de banda limitada.

La transformada inversa de Fourier de  $G(u,v)[S(u,v)*F(u,v)]$  produce  $f(x,y)$ . Las consideraciones precedentes son base para formar el teorema de muestreo bidimensional el cual establece que una función de banda limitada  $f(x,y)$  puede ser recuperada completamente de muestras cuya separación está dada por

$$\Delta x \leq 1/2W_u \quad (II.7.1a)$$

y

$$\Delta y \leq 1/2W_v \quad (II.7.1b)$$

Cuando  $f(x,y)$  esté espacialmente limitada por el uso de una ventana bidimensional  $h(x,y)$  análoga a la función  $h(x)$  usada en la figura II.M, nuevamente se tiene el problema de que la transformada de la función muestreada es distorsionada por la convolución de  $H(u,v)$  y  $S(u,v)*F(u,v)$ . Esta distorsión, la cual se debe a la naturaleza de las imágenes digitales espacialmente limitadas, impide la recuperación completa de  $f(x,y)$  a partir de sus muestras. Como el caso unidimensional, las funciones periódicas son una excepción, pero las imágenes que satisfacen estas condiciones son raramente encontradas en la práctica.

Un argumento similar a aquel desarrollado para el caso unidimensional puede ser llevado a cabo mostrando que la periodicidad proviene bidimensionalmente de la transformada de Fourier. Para una imagen de  $N \times N$ , este análisis produce también los siguientes resultados:

$$\Delta x_u = 1/N\Delta x_v \quad (\text{II.22a})$$

y

$$\Delta x_v = 1/N\Delta x_u \quad (\text{II.22b})$$

Estas relaciones entre las separaciones de las muestras garantizan que un periodo completo bidimensional estará cubierto por  $N \times N$  valores uniformemente espaciados en ambos dominios, espacial y frecuencial.

## II.5 TRANSFORMADA RAPIDA DE FOURIER

El número de multiplicaciones y adiciones complejas requeridas para implementar la ecuación (II.14) es proporcional a  $N^2$ . Esto puede ser visto fácilmente notando que, para cada uno de los  $N$  valores de  $u$ , la expansión del signo de suma (5) requiere de  $N$  multiplicaciones complejas de  $f(x)$  por  $e^{-j2\pi ux/N}$  y  $(N-1)$  adiciones de los resultados. Los términos  $e^{-j2\pi ux/N}$  pueden ser calculados y almacenados en una tabla para subsiguientes aplicaciones. Por esta razón, la multiplicación de  $u$  por  $x$  en estos términos no es usualmente considerada como parte directa de la implementación.

En esta sección se mostrara que, propiamente descomponiendo la ecuación (II.14), el número de operaciones de multiplicación y adición puede hacerse proporcional a  $N \log_2 N$ , la descomposición es llamada Algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier [1], [11], [12], [15], [17], [23], [47], [62], [69], [76], [84], [Apéndice A]. La reducción en proporcionalidad de  $N^2$  a  $N \log_2 N$  representa un significativo ahorro en esfuerzo computacional. Como se muestra en la siguiente tabla:

$N$	$N^2$ transformada directa	$N \log_2 N$ transformada rápida	Ventaja Computacional $N^2/N \log_2 N$
2	4	2	2.00
4	16	8	2.00
8	64	24	2.67
16	256	64	4.00
32	1,024	160	6.40
64	4,096	384	10.67
128	16,384	896	18.29
256	65,536	2,048	32.00
512	262,144	4,608	56.89
1,024	1,048,576	10,240	102.40
2,048	4,194,304	22,528	186.18
4,096	16,777,216	49,152	341.33
8,192	67,108,654	106,496	630.15
.	.	.	.
.	.	.	.

- $N$  = número de datos a transformarse.  
 $N^2$  y  $N \log_2 N$  = número de multiplicaciones y adiciones complejas de la transformada directa y rápida respectivamente.  
 $N^2/N \log_2 N$  = la relación de optimalidad entre los métodos de obtención de la información espectral.

### Algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier

El desarrollo del algoritmo de la transformada rápida de Fourier definido en la presente sección está basado en el llamado método de Cooley & Tukey. Es conveniente expresar la ecuación (II.14) de la forma siguiente

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) W_N^{ux} \quad \text{(II.73)}$$

donde

$$W_N = e^{-j2\pi/N} \quad \text{(II.74)}$$

y  $N$  se asume ser de la forma

$$N = 2^n \quad \text{(II.75)}$$

donde  $n$  es un entero positivo, en base a ello,  $N$  puede ser expresado como

$$N = 2M = 2(2^{n-1}) \quad \text{(II.76)}$$

donde  $M$  es también un entero positivo. La substitución de la ecuación (II.76) en la ecuación (II.73) produce

$$\begin{aligned} F(u) &= \frac{1}{2M} \sum_{x=0}^{2M-1} f(x) W_{2M}^{ux} \\ &= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x) W_{2M}^{u(2x)} + \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x+1) W_{2M}^{u(2x+1)} \right] \end{aligned} \quad \text{(II.77)}$$

de la ecuación (II.74),  $W_{2M}^{2ux} = W_M^{ux}$  así, la ecuación (II.77) puede ser expresada en la forma

$$F(u) = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x) W_M^{ux} + \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x+1) W_M^{ux} W_{2M}^u \right] \quad \text{(II.78)}$$

Si se define,

$$F_{\text{par}}(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(2x) W_M^{ux} \quad \text{(II.79)}$$

$u=0,1,\dots,M-1$

$$F_{\text{impar}}(u) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M/2-1} (2k+1) W_M^{uk} \quad (II.80)$$

$u=0,1,\dots,M-1$

entonces la ecuación (II.71) se define como

$$F(u) = \frac{1}{2} \left[ F_{\text{par}}(u) + F_{\text{impar}}(u) W_{2M}^u \right] \quad (II.81)$$

También ya que  $W_M^{u+M} = W_M^u$  y  $W_{2M}^{u+M} = -W_{2M}^u$  así de las ecuaciones (II.79) a la (II.81) se sigue que

$$F(u+M) = \frac{1}{2} \left[ F_{\text{par}}(u) - F_{\text{impar}}(u) W_{2M}^u \right] \quad (II.82)$$

Un análisis cuidadoso de las ecuaciones (II.79) a la (II.82) revela algunas propiedades interesantes de estas expresiones. Se define que una transformada de  $N$  puntos puede ser calculada dividiendo la expresión original en dos partes, como lo indicado en la ecuaciones (II.81) y (II.82). El cálculo de la primera mitad de  $F(u)$  requiere la evaluación de dos transformadas de  $(N/2)$  puntos dadas en las ecuaciones (II.79) y (II.80). Los valores resultantes de  $F_{\text{par}}(u)$  y  $F_{\text{impar}}(u)$  son entonces substituidos en la ecuación (II.81) para obtener  $F(u)$  para  $u=0,1,\dots,(N/2-1)$ . La otra mitad sigue directamente de la ecuación (II.82) sin transformación adicional.

#### Número de Operaciones

Se mostrará por inducción matemática que el número de multiplicaciones y adiciones complejas para implementar el algoritmo precedente está dado por

$$\begin{aligned} m(n) &= \frac{1}{2} 2^n \log_2 2^n \\ &= \frac{1}{2} N \log_2 N \\ &= \frac{1}{2} N n \quad \text{con } n \geq 1 \end{aligned} \quad (II.83)$$

y

$$\begin{aligned} a(n) &= 2^n \log_2 2^n \\ &= N \log_2 N \\ &= N n \quad \text{con } n \geq 1 \end{aligned} \quad (II.84)$$

Primero es necesario probar que las ecuaciones (II.83) y (II.84) son válidas para  $n=1$ , lo cual está dado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} m(1) &= \frac{1}{2} \cdot 2^1 \log_2 2^1 \\ &= \frac{1}{2} \cdot (2) \cdot (1) = 1 \end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned} a(1) &= 2^1 \log_2 2^1 \\ &= (2) \cdot (1) = 2 \end{aligned}$$

Posteriormente, se asume que las expresiones son válidas para todo  $n$ . Se requiere entonces probar que también lo son para  $n+1$ .

Por otra parte, para cualquier valor entero positivo de  $n$ , el número de multiplicaciones y adiciones requeridas para implementar la Transformada Rápida de Fourier está dada por las expresiones recursivas:

$$m(n) = 2m(n-1) + 2^{n-1} \quad \text{para } n \geq 1 \quad \text{(II.85)}$$

y

$$a(n) = 2a(n-1) + 2^n \quad \text{para } n \geq 1 \quad \text{(II.86)}$$

donde  $m(0)=0$  y  $a(0)=0$ , ya que la transformada de un sólo punto no requiere de ninguna adición ni multiplicación.

Así, de la ecuación (II.85) se tiene que

$$m(n+1) = 2m(n) + 2^n$$

Substituyendo la ecuación (II.83) en la ecuación anterior, se asume es válida para  $n$ , se tiene:

$$\begin{aligned} m(n+1) &= 2 \left( \frac{1}{2} \cdot 2^n \cdot n \right) + 2^n \\ &= 2 \left( \frac{1}{2} \cdot 2^n \cdot n \right) + 2^n \\ &= 2^n (n+1) \\ &= \frac{1}{2} \cdot 2^{n+1} \cdot (n+1) \end{aligned}$$

la ecuación (II.83) es entonces válida, para todos los valores de  $n$  enteros positivos.

De la ecuación (II.86), se tiene

$$a(n+1) = 2a(n) + 2^{n+1}$$

Substituyendo la ecuación (II.84) para  $a(n)$ , se tiene

$$\begin{aligned} a(n+1) &= 2(2^n) + 2^{n+1} \\ &= 2(2^n) + 2^{n+1} \\ &= 2^{n+1} (2+1) \end{aligned}$$

lo cual completa la prueba.

### Transformada Rápida de Fourier Inversa

Hasta ahora, poco se ha tratado concerniente a la transformada de Fourier inversa, no obstante que cualquier algoritmo para la implementación de la transformada de Fourier discreta puede también ser usado, con pequeñas modificaciones en los datos de entrada, para calcular la transformación inversa. Para percatarse de esto, se consideran las ecuaciones (II.14) y (II.15), las cuales son repetidas a continuación:

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) e^{-j2\pi ux/N} \quad (\text{II.87})$$

y

$$f(x) = \sum_{u=0}^{N-1} F(u) e^{j2\pi ux/N} \quad (\text{II.88})$$

Tomando el complejo conjugado de la ecuación (II.88) y dividiendo ambos lados por  $N$  se tiene

$$\frac{1}{N} f^*(x) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} F^*(u) e^{-j2\pi ux/N} \quad (\text{II.89})$$

Comparando este resultado con la ecuación (II.87), se nota que el lado derecho de la ecuación (II.89) está en la forma de la transformada de Fourier directa. Entonces, si los valores de entrada son de la forma  $F^*(u)$  en un algoritmo diseñado para calcular la transformada directa, el resultado será la cantidad  $f^*(x)/N$ . Tomando el complejo conjugado de éste resultado y multiplicándolo por  $N$ , se tiene la transformada inversa deseada  $f(x)$ .

Para arreglos bidimensionales cuadrados se toma el complejo conjugado de la ecuación (II.22); esto es

$$f^*(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} F^*(u,v) e^{-j2\pi(ux+vy)/N} \quad \text{(II.90)}$$

la cual se nota de la forma de una transformada de Fourier bidimensional directa dada en la ecuación (II.21). Se tiene entonces, que si la entrada de valores es de la forma  $F^*(u,v)$  en un algoritmo diseñado para calcular la transformación directa, el resultado será  $f^*(x,y)$ . Tomando el complejo conjugado de éste resultado se obtiene  $f(x,y)$ . En el caso en que  $f(x)$  ó  $f(x,y)$  son reales, la operación de complejo conjugado es innecesaria ya que  $f(x)=f^*(x)$  y  $f(x,y)=f^*(x,y)$  para funciones reales.

El hecho de que la transformada bidimensional es usualmente calculada por fases sucesivas de transformadas unidimensionales es una frecuente fuente de confusión cuando se usa la técnica anterior para obtener la inversa. En otras palabras cuando se usa un algoritmo unidimensional para calcular la inversa bidimensional, el método no es calcular el complejo conjugado después de cada renglón o columna procesada. En su lugar, la función  $F^*(u,v)$  es tratada como si fuera  $f(x,y)$  en la transformada bidimensional directa, proceso resumido en la figura II.B. El complejo conjugado del resultado, si es necesario, expresará la transformada inversa propiamente dicha,  $f(x,y)$ .



## Conclusión II

El propósito principal de este capítulo ha sido presentar un fundamento teórico de la transformada de Fourier y sus propiedades. Dentro de este contexto, los puntos esenciales necesarios para la comprensión básica de estos conceptos han sido desarrollados e ilustrados. El interés en la transformada de Fourier refleja su amplio ámbito de aplicación, no solo en proceso digital de señales, sino también en problemas de Proceso Digital de Imágenes. La información de la transformada rápida de Fourier es de particular importancia por sus implicaciones computacionales. Las propiedades de separabilidad, centralización, y convolución de la transformada de Fourier serán explotadas en los Capítulos III y IV.

El uso de transformaciones lineales en el proceso de señales digitales ha formado una disciplina formal que en su desarrollo trajo consigo la búsqueda de mejores algoritmos; así, para la implementación del algoritmo definido en esta tesis, se experimentó con un algoritmo alternativo, el de la transformada rápida de Hartley [12], [17], [50], [58], [68] con el principal interés de reducir los costos computacionales de precisión y velocidad; sin embargo, el prototipo programado de este algoritmo implicaba el uso de una tabla de referencia trigonométrica tan grande como el número de datos a transformar a fin de tener como resultado una transformación definida en el dominio de los números reales, aunado a esto, el tiempo de desarrollo era tan largo como el algoritmo convencional de Cooley & Tukey. Entonces, se optó por realizar un análisis detallado del algoritmo convencional Cooley Tukey, para explotarlo en el uso de imágenes digitales, así, la actual implementación contempla la referencia a una tabla trigonométrica optimizada de dimensión  $k \cdot \log_2 n$ , la cual carece de elementos redundantes y se calcula una sola vez previamente al desarrollo de la transformada rápida de Fourier propiamente dicha.

En el Apéndice A se definen esquemáticamente los procesos relacionados con la implementación de los conceptos teóricos de este capítulo y está complementado con una comparación entre el algoritmo final empleado en esta tesis y la prueba (benchmark MathCad v2.0) realizada por Eyle Publication Inc. que lleva a cabo para probar el desempeño de máquinas compatibles al estándar PC y PC inclusive, en un flujo unidimensional de 1024 datos reales de entrada, resaltando el hecho de que la versión base de esta tesis es aproximadamente, entre 100 a 125 más rápida que el sistema empleado por la publicación mencionada. El desarrollo histórico y la optimización realizada por I.M. Cooley & J.W. Tukey en IBM Watson Research Laboratories se detallan en la consideración del lector en las referencias citadas en el Apéndice E donde se están cronológicamente ordenadas.

**CAPITULO III**  
**FILTRO DIGITAL**  
**PARA PROCESO DE INGENIEROS**

III.1	III.2	III.3	III.4	III.5
<b>FILTROS EN EL DOMINIO DE FRECUENCIA ESPECTRAL</b>	<b>FILTROS PASA BAJA</b>	<b>FILTROS PASA ALTA</b>	<b>EVALUACION Y ANALISIS ESPECTRAL</b>	<b>FILTROS EN EL DOMINIO ESPACIAL</b>
- CONCEPTO	- FUNCIONES DE TRANSFERENCIA	- FUNCIONES DE TRANSFERENCIA	- DISCUSION - GENERALIZACION	- CONCEPTO
<ul style="list-style-type: none"> <li>. filtros pasa baja</li> <li>  alta</li> <li>  banda adaptativos</li> <li>. simetria radial</li> <li>. frecuencia de corte</li> <li>ecuaciones:</li> <li>III.1.....III.4</li> <li>figuras:</li> <li>III.A</li> <li>paginas [71-73]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. filtros de convolucion espectral:</li> <li>  ideal</li> <li>  parabolico</li> <li>  butterworth</li> <li>  exponencial</li> <li>  gaussiano</li> <li>  trapezoidal</li> <li>  rampa</li> <li>ecuaciones:</li> <li>III.5.....III.16</li> <li>figuras:</li> <li>III.B.....III.H</li> <li>paginas [74-88]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. filtros de convolucion espectral:</li> <li>  ideal</li> <li>  parabolico</li> <li>  butterworth</li> <li>  exponencial</li> <li>  gaussiano</li> <li>  trapezoidal</li> <li>  rampa</li> <li>ecuaciones:</li> <li>III.17.....III.27</li> <li>figuras:</li> <li>III.I.....III.O</li> <li>paginas [81-86]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. porcentaje de energia filtrada</li> <li>. funciones multicanal isotropicas:</li> <li>  - pasa alta</li> <li>  - pasa baja</li> <li>  - pasa banda</li> <li>ecuaciones:</li> <li>III.28.....III.38</li> <li>paginas [87-91]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. filtros de respuesta impulsiva finita</li> <li>. clasificacion</li> <li>. referencia a los nucleos de convolucion espacial en el apendice A</li> <li>ecuaciones:</li> <li>III.31.....III.35</li> <li>paginas [92-96]</li> </ul>

**CONCLUSION III**

### III.1 FILTROS EN EL DOMINIO DE FRECUENCIA ESPECTRAL

Un filtro es un concepto matemático cuya misión es la de amortiguar o eliminar todas las señales no comprendidas en una banda de frecuencia asignada, llamada banda pasante, la cual está definida por las frecuencias límite. De acuerdo con las frecuencias comprendidas en la banda pasante, los filtros se clasifican en:

Pasa Bajo, cuando la banda pasante abarca todas las frecuencias comprendidas entre 0 y una frecuencia límite  $D_0$ .

Pasa Alto, cuando la banda pasante comprende todas las frecuencias superiores a una frecuencia dada  $D_0$ .

Pasa Banda, cuando la banda pasante está comprendida entre dos frecuencias límites,  $D_0$  diferente de cero y  $D_1$  diferente de infinito.

Elimina Banda, cuando la banda pasante abarca todas las frecuencias excepto las comprendidas entre dos frecuencias límite diferentes de cero y de infinito.

Multi Banda, cuando presenta más de una banda pasante.

Un filtro es lineal cuando cumple con las propiedades de homogeneidad y de sobreposición; la primera propiedad implica que si la entrada se amplifica o se reduce multiplicándola o dividiéndola por un escalar, entonces la salida estará multiplicada o dividida por ese escalar; la segunda propiedad implica que la respuesta de dos imágenes sobrepuestas debe de ser idéntica a la que se obtendría al sobreponer las respuestas de ese filtro a cada una de las entradas por separado.

La base de las técnicas en el dominio de las frecuencias espectrales es el teorema de Convolución. Sea  $g(x,y)$  una imagen formada por la convolución de una imagen  $f(x,y)$  y un operador de posición invariante  $h(x,y)$ <sup>1</sup>, esto es,

$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y) \quad \text{(III.1)}$$

Entonces, del teorema de Convolution, se tiene que la siguiente relación en el dominio de las frecuencias es válida

$$G(u,v) = H(u,v) \cdot F(u,v) \quad \text{(III.2)}$$

donde  $G$ ,  $H$  y  $F$  son las transformadas de Fourier de  $g$ ,  $h$  y  $f$ , respectivamente. La transformada  $H(u,v)$  es denominada función de transferencia del proceso.

En una imagen típica  $f(x,y)$ , el problema de proceso está dado, y el objetivo después del cálculo de  $F(u,v)$ , es el de seleccionar  $H(u,v)$  tal que la imagen deseada, dada por,

$$g(x,y) = F^{-1} [ H(u,v)F(u,v) ] \quad \text{(III.3)}$$

exhiba alguna característica resaltada de  $f(x,y)$ . Por instancia, los contornos en  $f(x,y)$  pueden ser acentuados usando la función  $H(u,v)$  para que resalte los componentes de alta frecuencia de  $F(u,v)$  o el ruido de la misma imagen  $f(x,y)$  puede ser atenuado usando otra función  $H(u,v)$  preservando únicamente los componentes de baja frecuencia de  $F(u,v)$ .

La función  $H(u,v)$  es referida en este contexto como función de transferencia o filtro, todos los filtros considerados en el dominio espectral de Fourier son radialmente simétricos con respecto al origen. Para este tipo de filtro es suficiente con especificar una sección transversal que se extiende como una función de distancia al origen a lo largo de una línea radial, como se muestra en la figura III.A.

<sup>1</sup> Un operador de posición invariante o isotropo es aquel cuyo resultado depende sólo del valor de  $f(x,y)$  en un punto dado en la imagen y no de la posición del punto. La invarianza en la posición es un requisito implícito en la definición de las integrales de convolución dadas en las ecuaciones (II.46) y (II.53) del Capítulo II.

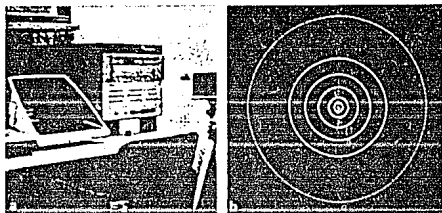


Figura III.A. (a) un ejemplo de una (b) un ejemplo de una función de onda de transición. La función de onda de transición es una función de onda de onda de transición que se obtiene al aplicar la transformada de Fourier a la función de onda de transición de la ecuación (II.32). La función de onda de transición de la ecuación (II.32) es una función de onda de transición que se obtiene al aplicar la transformada de Fourier a la función de onda de transición de la ecuación (II.32).

La función de onda de transición puede ser escrita en forma de onda de transición de transición de  $360^\circ$  en relación al origen. Se debe también notar que la transformación de Fourier parcialmente invertida, aplicada sobre el grado de libertad de frecuencia, resulta en la función de onda de transición de la transformada de onda de transición sobre el eje de onda de transición. Véase el Capítulo II ecuación (II.32).

Sea  $B_0$  es una cantidad escalar negativa específica, y  $R_0(x,y)$  es la distancia del punto  $(x,y)$  al origen del plano de la frecuencia, esto es,

$$R_0(x,y) = [x^2 + y^2]^{1/2} \quad (III.4)$$

Si  $B_0$  es una cantidad escalar negativa específica, en el origen, el punto  $O$ , trata un círculo y se obtiene un círculo de frecuencias de corte todas las cuales están a  $B_0$  distancia del origen (figura III.A).

### III.2 FILTROS PASA BAJA

Caracteres y otros símbolos presentados, tal como se ve en la sección II.3, se refieren usualmente al contenido de armónicos de alta frecuencia reflejados en su transformada de Fourier. El cuadrante donde llevarse a cabo a través de la atenuación en el dominio de las frecuencias en un rango específico de armónicos en la transformada de una imagen dada.

De la ecuación (III.2) se tiene la relación

$$G(u,v) = H(u,v)f(u,v) \quad (III.5)$$

donde  $f(u,v)$  es la transformada de la imagen que se desea suavizar. El problema se el de seleccionar una función  $H(u,v)$  la cual permita suavizar atenuando los componentes de alta frecuencia de  $f(u,v)$ , la transformada inversa de  $G(u,v)$  producirá entonces la imagen suavizada deseada  $g(x,y)$  ya que los componentes de alta frecuencia son filtrados y la información en el plano de las bajas frecuencias es pasada relativamente sin atenuación. Este método es referido genéricamente como filtro pasa baja. Algunos filtros pasa baja se proponen a continuación, en todos los casos los filtros con funciones cuyo efecto corresponden a los componentes real e imaginario de la transformada de Fourier en exactamente la misma proporción. Tales filtros se denominan filtros de fase y cambio linealmente por que no alteran la fase de la transformada [1], [6], [11], [16], [22], [26], [27], [52], [66], [74], [95], [96].

#### Filtro Ideal Pasa Baja

Un filtro ideal bidimensional pasa baja es una función que satisface la relación

$$H(u,v) = \begin{cases} 1 & \text{si } D(u,v) \leq D_0 \\ 0 & \text{si } D(u,v) > D_0 \end{cases} \quad (III.6)$$

donde  $D_0$  es la frecuencia de corte especificada, y  $D(u,v)$  es la distancia del punto  $(u,v)$  al origen del plano de la frecuencia, definida por la ecuación (III.4).

El nombre de filtro ideal proviene del hecho de que todas las frecuencias dentro del círculo de radio  $D_0$  son pasadas sin atenuación, mientras que todas las frecuencias fuera de este círculo son completamente anuladas.

Para un filtro ideal la sección de corte, es decir, el punto de transición entre  $H(u,v)=1$  y  $H(u,v)=0$  es denominado frecuencia de corte. En el caso de la figura III.B, por ejemplo, la frecuencia de corte es  $D_0$ .

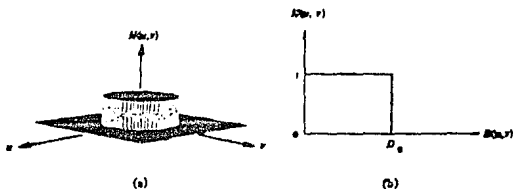


figura III.B. (a) perspectiva de la función de transferencia ideal pasa baja (b) corte seccional del filtro.

La forma de  $h(x,y)$  depende del radio de la función filtro en el dominio de las frecuencias. Calculando la transformada inversa de  $H(u,v)$  para un filtro ideal pasa baja, puede mostrarse que el radio de los anillos concéntricos en  $h(x,y)$  son inversamente proporcional al valor de  $D_0$  en la ecuación (III.5). Entonces, severos filtrados en el dominio de las frecuencias, es decir  $D_0$  pequeños, producen un gran número de anillos en la región  $N \times N$  dominando la definición de  $F(u,v)$ .  $H(u,v)$  se hace unitaria en la correspondiente región espacial de  $N \times N$  y la convolución de  $h(x,y)$  y  $f(x,y)$  es simplemente  $f(x,y)$ .

### Filtro Parabólico Pasa Baja

El filtro parabólico pasa baja es un filtro de suavizamiento empleado en el Proceso de Imágenes. El filtro parabólico pasa baja con frecuencia de corte localizada a la distancia  $D_0$  del origen tiene una función de transferencia dada por la relación

$$H(u,v) = \begin{cases} 1 - (D(u,v)/D_0)^{2n} & \text{si } D(u,v) < D_0 \\ 0 & \text{si } D(u,v) \geq D_0 \end{cases} \quad \text{(III.7)}$$

donde  $D(u,v)$  está dada por la ecuación (III.4), y  $n$  controla el grado de atenuación o decadencia de la función cuadrática. Un corte seccional de este filtro es mostrado en la figura III.C

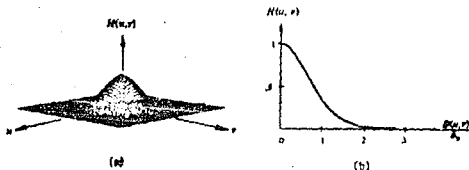


figura 111.8. (a) perspectiva de la función de transferencia parabólica para baja (b) corte seccional del filtro.

Sin embargo, al hacerse  $D(u,v)=D_0$  en la frecuencia de corte, la función  $H(u,v)$  en ambos criterios es 0, entonces aplicando un escalamiento del orden de  $\sqrt{2-1}$  se tiene una nueva relación

$$H(u,v) = \begin{cases} 1 - [\sqrt{2-1}](D(u,v)/D_0)^{2n} & \text{si } D(u,v) \leq D_0 \\ 0 & \text{si } D(u,v) \geq D_0 \end{cases} \quad (111.81)$$

#### Filtro Butterworth Pasa Baja

La función de transferencia del filtro pasa baja Butterworth de orden  $n$  y con frecuencia de corte localizada a distancia  $D_0$  del origen está definida por la relación

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + [D(u,v)/D_0]^{2n}} \quad (111.9)$$

donde  $D(u,v)$  está dado por la ecuación (111.4). Una sección transversal del filtro pasa baja Butterworth es mostrado a continuación figura 111.9

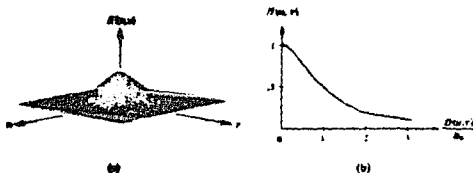


figura 111.9. (a) filtro Butterworth para baja (b) corte seccional para n=1.



A diferencia del filtro ideal, la función de transferencia del filtro Butterworth no tiene una discontinuidad pronunciada en la frecuencia de corte, que establezca, un corte claro entre las frecuencias pasadas y las filtradas. Para filtros con función de transferencia atenuante, se acostumbra definir frecuencias de corte ubicadas en puntos para los cuales  $H(u,v)$  está por debajo de una cierta fracción de su máximo valor.

En el caso de la ecuación (III.9) se tiene que  $H(u,v)=0.5$  (50% abajo del máximo valor 1) cuando  $D(u,v)=D_0$ . Otro valor comunmente usado es  $1/\sqrt{2}$  del máximo valor de  $H(u,v)$  para la ecuación (III.9), la siguiente modificación produce el valor deseado cuando  $D(u,v)=D_0$

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + [\sqrt{2}-1] [D(u,v)/D_0]^{2n}} \quad \text{(III.10)}$$

#### Filtro Exponencial Pasa Baja

El filtro exponencial pasa baja es otro filtro de suavizamiento comunmente empleado en el Proceso de Imágenes. El filtro exponencial pasa baja con frecuencia de corte localizada a la distancia  $D_0$  del origen tiene una función de transferencia dada por la relación

$$H(u,v) = e^{-[D(u,v)/D_0]^{2n}} \quad \text{(III.11)}$$

donde  $D(u,v)$  está dada por la ecuación (III.4),  $n$  controla la tasa de atenuación o decadencia de la función exponencial. Un corte seccional de este filtro es mostrado en la figura III.E

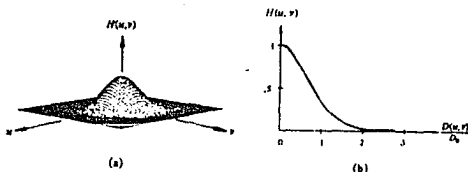


figura III.E. (a) perspectiva del filtro exponencial pasa baja (b) corte seccional para un orden de  $n=2$ .

A diferencia del filtro ideal, la función de transferencia del filtro Butterworth no tiene una discontinuidad pronunciada en la frecuencia de corte, que establezca un corte claro entre las frecuencias pasadas y las filtradas. Para filtros con función de transferencia atenuante, se acostumbra definir frecuencias de corte ubicadas en puntos para los cuales  $H(u,v)$  está por debajo de una cierta fracción de su máximo valor.

En el caso de la ecuación (III.9) se tiene que  $H(u,v)=0.5$  (50% abajo del máximo valor 1) cuando  $D(u,v)=D_0$ . Otro valor comúnmente usado es  $1/\sqrt{2}$  del máximo valor de  $H(u,v)$  para la ecuación (III.9), la siguiente modificación produce el valor deseado cuando  $D(u,v)=D_0$ .

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + [\sqrt{2}-1] [D(u,v)/D_0]^{2n}} \quad \text{(III.10)}$$

#### Filtro Exponencial Pasa Baja

El filtro exponencial pasa baja es otro filtro de suavizamiento comúnmente empleado en el proceso de imágenes. El filtro exponencial pasa baja con frecuencia de corte localizada a la distancia  $D_0$  del origen tiene una función de transferencia dada por la relación

$$H(u,v) = e^{-[D(u,v)/D_0]^{2n}} \quad \text{(III.11)}$$

donde  $D(u,v)$  está dada por la ecuación (III.4),  $n$  controla la tasa de atenuación o decadencia de la función exponencial. Un corte seccional de este filtro es mostrado en la figura III.E.

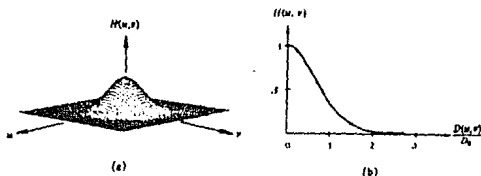


figura III.E. (a) perspectiva del filtro exponencial pasa baja (b) corte seccional para un orden de  $n=2$ .

Cuando  $D(u,v)=D_0$ , se tiene de la ecuación (III.11) que  $H(u,v)=1/\alpha$ . Una simple modificación dada por

$$H(u,v) = e^{-\alpha \ln(1/\sqrt{2})} [D(u,v)/D_0]^{-2\alpha} \quad (III.12)$$

forza a  $H(u,v)$  a ser igual a  $1/\sqrt{2}$  de su máximo valor en las frecuencias localizadas en el corte.

### Filtro Gaussiano Pasa Baja

El filtro gaussiano pasa baja es un filtro de suavizamiento que puede ser conceptualizado como un filtro en forma de distribución uniforme (forma de campana). El filtro gaussiano pasa baja con frecuencia de corte localizada a la distancia  $D_0$  del origen tiene una función de transferencia dada por la relación

$$H(u,v) = e^{-\pi [D(u,v)/D_0]^{2n}} \quad (III.13)$$

donde  $D(u,v)$  está dada por la ecuación (III.4), y  $n$  controla la tasa de atenuación o decadencia de la función exponencial. Un corte seccional de este filtro es mostrado en la figura III.E.

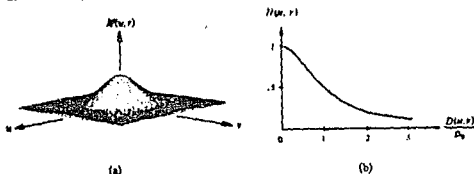


figura III.E. (a) filtro gaussiano en perspectiva  
(b) corte seccional respectivo.

Cuando  $D(u,v)=D_0$ , se tiene de la ecuación (III.13) que  $H(u,v)=e^{-\pi}$ . Una simple modificación dada por

$$H(u,v) = e^{-\alpha \ln(1/\sqrt{2})} \pi [D(u,v)/D_0]^{2\alpha} \quad (III.14)$$

forza a  $H(u,v)$  a ser igual a  $1/\sqrt{2}$  de su máximo valor en las frecuencias localizadas en el corte.

### Filtro Trapezoidal Pasa Baja

Un filtro trapezoidal pasa baja se puede conceptualizar como un compromiso entre el filtro ideal pasa baja y un filtro completamente suavizante y se define por la relación

$$H(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{si } D(u, v) \leq D_0 \\ \frac{1}{D_1 - D_0} [D_1 - D(u, v)] & \text{si } D_0 \leq D(u, v) \leq D_1 \quad \text{(III.15)} \\ 0 & \text{si } D(u, v) \geq D_1 \end{cases}$$

donde  $D(u, v)$  está dado por la ecuación (III.4),  $D_0$  y  $D_1$  son especificados, y se asume que  $D_0 < D_1$ . Un corte seccional de la función de transferencia trapezoidal es mostrado en la figura III.G.

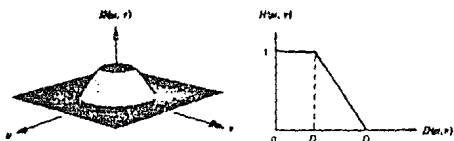


figura III.G. Representación 3D y corte seccional de un filtro trapezoidal pasa baja.

Por conveniencia en su implementación, se define la frecuencia de corte en la primera intersección  $D_0$  de la función de transferencia. La frecuencia de corte  $D_1$  es arbitraria, tal que sea mayor que  $D_0$ .

### Filtro Pampa Pasa Baja

El filtro pampa pasa baja es un filtro de atenuación o decadencia uniforme que puede ser conceptualizado como un filtro de forma cónica. Su frecuencia de corte está localizada a la distancia  $D_0$  del origen con una función de transferencia dada por la relación

$$H(u, v) = \begin{cases} (D_0 - D(u, v)) / D_0 & \text{si } D(u, v) \leq D_0 \\ 0 & \text{si } D(u, v) \geq D_0 \quad \text{(III.16)} \end{cases}$$

donde  $D(u, v)$  está dada por la ecuación (III.4). Un corte seccional de este filtro es mostrado en la figura III.H

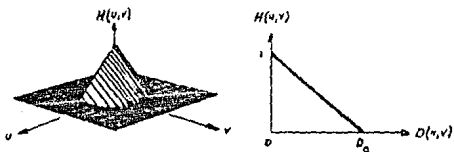


figura III.H. perspectiva y corte seccional de un filtro rampa pasa baja.

El filtro rampa pasa baja es en realidad una versión del filtro trapezoidal pasa baja con  $D_0=0$  y  $D_1$  igual a la frecuencia de corte correspondiente. Siendo en éste caso más directa la función de transferencia de la relación (III.15).

## III.3 FILTROS PASA ALTA

Se ha mostrado en la sección anterior que una imagen puede ser levemente atenuada, los componentes de alta frecuencia de su transformada de Fourier, y que los contornos y otros cambios repentinos en niveles de gris están asociados con los componentes de alta frecuencia. La definición de la imagen puede lograrse en el dominio de las frecuencias a través de un proceso de filtrado pasa-alta, el cual atenúa o elimina los componentes de baja frecuencia sin perturbar la información de las altas frecuencias de la transformada de Fourier. Se expone a continuación, las contrapartes de los filtros desarrollados en la sección anterior. Como anteriormente, se considerarán solo los filtros de fase y amplitud invariantes, los cuales son radialmente simétricos y pueden ser completamente especificados por un corte seccional extendiéndose en función de la distancia al origen [11, 16], [2], [5], [12], [26], [23], [52], [59], [24], [61], [90].

## Filtro Ideal Pasa Alta

Un filtro ideal pasa-alta bidimensional es aquel cuya función de transferencia satisface la relación:

$$H(u,v) = \begin{cases} 0 & \text{si } D(u,v) \leq D_0 \\ 1 & \text{si } D(u,v) > D_0 \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

donde  $D_0$  es la distancia de corte cuantificada del origen del plano de la frecuencia, y  $D(u,v)$  está dado por la ecuación (III.4). El corte seccional de este filtro se muestra en la figura III.1

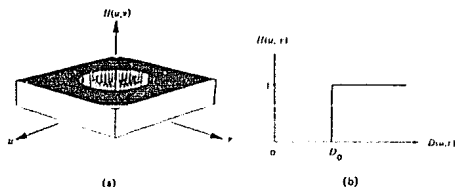


figura III.1, perspectiva y corte seccional del filtro ideal pasa-alta.

Este filtro, se el opuesto del filtro ideal pasa-baja discutido en la ecuación (III.6), ya que éste completamente atenúa todas las frecuencias dentro del círculo de radio  $D_0$  mientras que pasa, sin atenuación, todas las frecuencias fuera del círculo.

### Filtro Parabólico Pasa Alta

El filtro parabólico pasa alta es un filtro de retardamiento constante en el tiempo. El filtro parabólico pasa alta con frecuencia de corte localizada a la distancia  $D_0$  del origen tiene una función de transferencia dada por la relación

$$H(u,v) = \begin{cases} (D(u,v)/D_0)^{2n} & \text{si } D(u,v) \leq D_0 \\ 1 & \text{si } D(u,v) > D_0 \end{cases} \quad (III.18)$$

donde  $D(u,v)$  está dada por la ecuación (III.4), y  $n$  controla la tasa de amplificación o incremento de la función cuadrática. Un corte seccional de este filtro es mostrado en la figura III.J

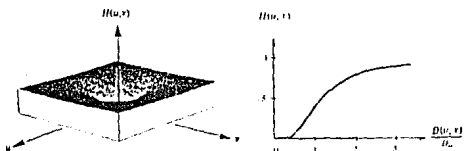


Figura III.J. Respuesta y corte seccional del filtro parabólico pasa alta.

sin embargo, al hacerse  $D(u,v) > D_0$  en la frecuencia de corte, la función  $H(u,v)$  en ambos criterios es 1, entonces aplicando un escalamiento del orden de  $2n-1$  se tiene una nueva relación

$$H(u,v) = \begin{cases} [2n-1(D(u,v)/D_0)^{2n}] & \text{si } D(u,v) \leq D_0 \\ 1 & \text{si } D(u,v) > D_0 \end{cases} \quad (III.19)$$

### Filtro Butterworth Pasa Alta

La función de transferencia del filtro pasa alta Butterworth de orden  $n$  y con frecuencia de corte localizada a  $D_0$  distancia del origen está definida por la relación

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + [D_0/D(u,v)]^{2n}} \quad (III.20)$$

donde  $D(u,v)$  está dada por la ecuación (III.4). El corte seccional del filtro pasa alta Butterworth se muestra en la figura III.K

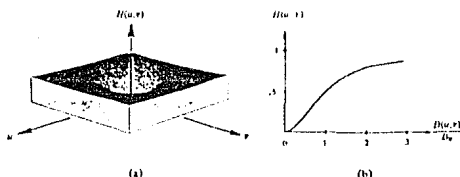


figura III.K. perspectiva y corte seccional del filtro Butterworth Pasa Baja de orden  $n$ .

Cuando  $D(u,v) = D_0$ ,  $H(u,v)$  está por debajo de  $1/2$  de su máximo valor. Como en el caso del filtro Butterworth pasa baja, es práctica común seleccionar una frecuencia de corte en los puntos para los cuales  $H(u,v)$  está por debajo de  $1/2$  de su máximo valor. La ecuación (III.20) es fácilmente modificada para definir esta restricción, utilizando el siguiente exponente:

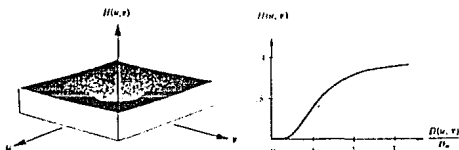
$$H(u,v) = \frac{1}{1 + [32-n] [D_0/D(u,v)]^{2n}} \quad (\text{III.21})$$

#### Filtro Exponencial Pasa Alta

El filtro exponencial pasa alta con frecuencia de corte ubicada a la distancia  $D_0$  del origen tiene una función de transferencia definida por la relación

$$H(u,v) = e^{-[D_0/D(u,v)]^{2n}} \quad (\text{III.22})$$

donde  $D(u,v)$  está definida por la ecuación (III.4) y el parámetro  $n$  controla la tasa de incremento de  $H(u,v)$  en función de la distancia a partir del origen. Un esquema de perspectiva y corte seccional de la función está dado en la figura III.L:





Cuando  $D(u,v) = D_0$  se tiene de la ecuación (III.22) que  $H(u,v) = 1/e$ . Una simple modificación dada por

$$H(u,v) = e^{-\alpha [\ln(1/\sqrt{2})] \{D_0/D(u,v)\}^{2n}} \quad (III.23)$$

forza a  $H(u,v)$  a ser igual a  $1/\sqrt{2}$  de su máximo valor en las frecuencias localizadas en el plano de corte.

### Filtro Gaussiano Pasa Alta

El filtro gaussiano pasa alta es un filtro de suavizamiento que puede ser conceptualizado como un filtro en forma de distribución (forma de campana invertida). El filtro gaussiano pasa alta con frecuencia de corte localizada a la distancia  $D_0$  del origen tiene una función de transferencia definida por la relación

$$H(u,v) = 1 - e^{-\alpha [D(u,v)/D_0]^{2n}} \quad (III.24)$$

donde  $D(u,v)$  está dada por la ecuación (III.4),  $\alpha$  controla la tasa de amplificación o incremento de la función exponencial. Un corte seccional de este filtro es mostrado en la figura III.M.

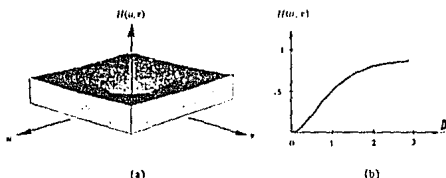


figura III.M. Respuesta y corte seccional del filtro gaussiano pasa alto de orden  $2n$ .

Cuando  $D(u,v) = D_0$  se tiene de la ecuación (III.24) que  $H(u,v) = 1 - e^{-\alpha}$ . Una simple modificación dada por

$$H(u,v) = 1 - e^{-\alpha [\ln(1/\sqrt{2})] \alpha \{D(u,v)/D_0\}^{2n}} \quad (III.25)$$

forza a  $H(u,v)$  a ser igual a  $1/\sqrt{2}$  de su máximo valor en las frecuencias localizadas en el corte.

### Filtro Trapezoidal Pasa Alta

Un filtro trapezoidal pasa alta está definido por la relación

$$H(u,v) = \begin{cases} 0 & \text{si } D(u,v) < D_1 \\ \frac{1}{[D_0 - D_1]} [D(u,v) - D_1] & \text{si } D_1 \leq D(u,v) \leq D_0 \\ 1 & \text{si } D(u,v) > D_0 \end{cases} \quad \text{(III.26)}$$

donde  $D(u,v)$  está dada por la ecuación (III.4).  $D_0$  y  $D_1$  están especificados, y se asume que  $D_0 > D_1$ . El corte seccional de la función de transferencia se muestra en la figura III.N.

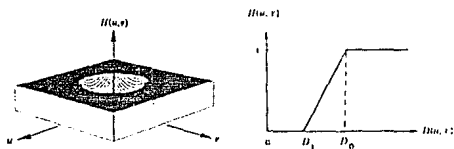


figura III.N. perspectiva y corte seccional del filtro trapezoidal pasa alta.

Por conveniencia en la implementación, la frecuencia de corte se ubica en  $D_0$  en lugar del radio para el cual  $H(u,v)$  es  $1/2$  de su máximo valor. La segunda variable,  $D_1$  es arbitraria, tanto como sea menor que  $f_0$ .

### Filtro Rampa Pasa Alta

El filtro rampa pasa alta es un filtro de corte alto de tipo que puede ser conceptualizado como un filtro de forma de cono invertido. Su frecuencia de corte está localizada a la distancia  $D_0$  del origen con una función de transferencia dada por la relación

$$H(u,v) = \begin{cases} D(u,v)/D_0 & \text{si } D(u,v) \leq D_0 \\ 1 & \text{si } D(u,v) > D_0 \end{cases} \quad \text{(III.27)}$$

donde  $D(u,v)$  está dada por la ecuación (III.4). Un corte seccional de este filtro es mostrado en la figura III.O

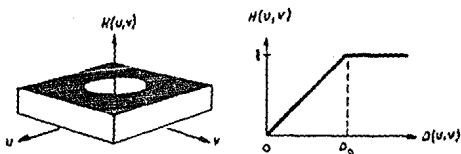


figura III.8. Parámetros y corte longitudinal del filtro  
 plano paso alto.

El filtro de paso alto es en realidad una versión del filtro trapezoidal paso alto con  $D_1=0$  y  $D_0$  igual a la frecuencia de corte correspondiente, siendo en este caso más directa la función de transferencia de la relación (III.26).

### III.4 EVALUACION Y ANALISIS ESPECTRAL

#### Porcentaje de Energía Filtrada

El concepto de frecuencias de corte es muy útil para especificar las características de un filtro dado y también sirve como base común para comparar el comportamiento de diferentes tipos de filtros.

La energía total de la señal,  $E_t$  se obtiene sumando en cada punto  $(u,v)$  para  $u,v=0,1,2,\dots,N-1$ ; esto es,

$$E_t = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} E(u,v) \quad \text{(III.28)}$$

donde  $E(u,v)$  está dado por la ecuación (II.13). Asumiendo que la transformada ha sido centrada, un círculo de radio  $r$  con origen en el centro del cuadro de la frecuencia incluye  $B$  porcentaje de energía, donde

$$B = 100 \left[ \sum_u^{\text{Do}} \sum_v^{\text{Do}} E(u,v) / E_t \right] \quad \text{(III.29)}$$

y la suma es tomada sobre los valores de  $(u,v)$  que están dentro del límite de la frecuencia de corte.

### Modelo Multicanal con Filtros Isótropos

El modelo monocanal ha sido el primero que se ha utilizado para representar la primera etapa del proceso, encontrándose en la mayoría de los sistemas; consta de un solo filtro con una función de transferencia definida por simetría radial en una frecuencia de corte específica. Los valores próximos a la frecuencia fundamental involucran las bajas frecuencias, y a medida que se incrementa la distancia respecto al origen se hallan las altas frecuencias, tal es el caso de los filtros empleados en la sección III.2 y III.3.

Entre las novedades aportadas por el estudio del Sistema Visual Humano está la teoría multicanal, la cual define que nuestro sistema analizador de imágenes no es único, sino múltiple. Antes de ser analizada, la imagen que capta la retina, es descompuesta por un banco de filtros casi lineales y que trabajan de forma casi independiente para producir como salida un conjunto de imágenes de banda limitada; éste conjunto de imágenes serán analizadas separadamente y la información extraída de cada una de ellas será utilizada directamente o combinada con las demás para facilitar una descripción útil del entorno visual.

El modelo multicanal utiliza una sucesión de filtros cuya función de transferencia es cualquiera de las funciones de transferencia definidas anteriormente en las secciones III.2 y III.3, donde para el *i*-ésimo canal se tienen las siguientes expresiones analíticas:

#### Filtros Pasa Baja Multicanal - Adaptados

Filtro Cuadrático,

$$H(u,v) = \begin{cases} A \cdot [1 - C \cdot (D(u,v)/D_0 \cdot \sigma)^{2n}] & \text{si } D(u,v) < D_0 \\ 0 & \text{si } D(u,v) \geq D_0 \end{cases} \quad \text{(III.30)}$$

Filtro Butterworth,

$$H(u,v) = A \cdot \left[ \frac{1}{1 + C \cdot [D(u,v)/D_0 \cdot \sigma]^{2n}} \right] \quad \text{(III.31)}$$

Filtro Exponencial,

$$H(u,v) = A \cdot \left[ e^{-E \cdot [D(u,v)/D_0 \cdot \sigma]^{2n}} \right] \quad \text{(III.32)}$$

**Filtros Pasa Baja Multicanal - Adaptados**

Filtro Gaussiano,

$$H(u,v) = A \cdot \left[ e^{-D(u,v)/D_0 \sigma^2} \right] \quad (III.33)$$

Filtro Rampa,

$$H(u,v) = \begin{cases} A \cdot [1 - D(u,v)/D_0 \sigma] & \text{si } D(u,v) \leq D_0 \\ 0 & \text{si } D(u,v) > D_0 \end{cases} \quad (III.34)$$

donde  $A$  es el porcentaje relativo de la cantidad del espectro de  $E_{\text{Equil.}}$  - esto definido como  $A/100$ , - de donde los valores de  $D(u,v)$  en el intervalo de  $(0, D_0]$ , por tanto el de  $\sigma$  está en  $(1, 100]$  por otro parte,  $D_0/2$  y  $(100/2)$  definidas como las constantes de  $\sigma$  y  $D(u,v)$  expresadas implícitamente en las funciones de transferencia de la sección III.2 y III.3.

Así, conforme  $\sigma$  se incrementa, se le considera asociado un respectivo canal, de ahí la denominación multicanal. El primer canal relativo sólo deja pasar los componentes sinusoidales de la imagen que tienen una frecuencia espacial muy baja; el siguiente sólo pasa también los de frecuencias situadas hasta un cierto nivel por encima y así los restantes. Así, por la sucesión de filtros, la información discernible va desde detalles a la general; esto permite una extracción progresiva de la información contenida en la imagen original.

**Filtros Pasa Alta Multicanal - Adaptados**

Filtro Cuadrático,

$$H(u,v) = \begin{cases} A \cdot [D(u,v)/D_0 \sigma]^2 & \text{si } D(u,v) \leq D_0 \\ 1 & \text{si } D(u,v) > D_0 \end{cases} \quad (III.35)$$

Filtro Butterworth,

$$H(u,v) = A \cdot \left[ \frac{1}{1 + C [D_0 \sigma / D(u,v)]^{2n}} \right] \quad (III.36)$$

Filtro Exponencial,

$$H(u,v) = A \cdot \left[ e^{-[D_0 \sigma / D(u,v)]^{2n}} \right] \quad (III.37)$$

## Filtros Pasa Alta Multicanal - Adaptados

Filtro Gaussiano:

$$H(u,v) = A \cdot \left[ 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{u^2 + v^2}{D_0}\right)^2\right\}\right] \quad (III.39)$$

Filtro Bessel:

$$H(u,v) = \begin{cases} A \cdot [J_0(u,v)/D_0] & \text{si } D(u,v) \leq D_0 \\ 1 & \text{si } D(u,v) > D_0 \end{cases} \quad (III.39)$$

donde A es el porcentaje relativo de la amplitud de respuesta de Fourier definida como  $A = 1/D_0$ , su función de valores se encuentra en el intervalo de (0,1], por tanto el de  $\sigma$  está en el mismo rango y por lo tanto  $D_0 = [(\sigma)^2/2]$  definidas como las constantes de proporcionalidad expresada implícitamente en las funciones de transferencia de la sección III.2 y III.3. La figura III.P ilustra el uso de filtros multicanal para el análisis de imágenes, los cuales imponen de resolución diferentes, donde el parámetro  $D_0$  se incrementa de (a) pequeña, (b) mediana y (c) grande.

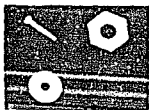


Figura III.P. Sistema multicanal con filtros pasa alta adaptados.

Este modelo permite trabajar al nivel de la resolución que cada tarea requiere, en tareas de reconocimiento de piezas dispuestas o en tareas que requieren poca resolución permite trabajar con representaciones muy compactas de la escena; además siempre existe la posibilidad de que el sistema utilice una mayor resolución cuando sea necesario.

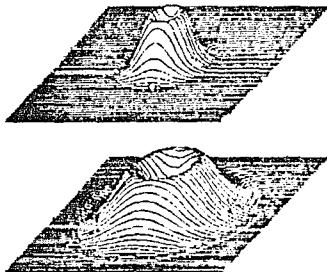
### Modelo Multicanal con Filtros Pasa Banda Isótropos

Este modelo responde también a la idea de que la información visual se halla distribuida en sucesivos niveles de resolución. La diferencia con respecto al modelo anterior consiste en que la información transmitida por los sucesivos canales se traslapa poco o nada, ya que cada canal es transparente para los componentes sinusoidales de la imagen que se hallan en una determinada banda de frecuencia espectral, mientras que atenúa los armónicos ubicados en otras bandas. Cada uno de estos filtros presenta una función de transferencia FTM que también es radialmente simétrica, definida frecuentemente como una diferencia de filtros gaussianos cuya descripción analítica es:

$$H(u,v) = A \cdot \left[ e^{-E[u^2+v^2]/(2\sigma^2)} \right] - B \cdot \left[ e^{-E[u^2+v^2]/(2\sigma^2)} \right] \quad (III.40)$$

(III.40)

con  $A > B$  y  $\sigma > 0$ , y  $E = \ln(1/2)$ . Las salidas de todos los canales forman un banco de imágenes de paso banda, en cada una de las cuales pueda hallarse información cuya naturaleza está asociada a los diferentes niveles de resolución. La **figura III.9** representa el aspecto en perspectiva de la diferencia gaussiana definida analíticamente en la ecuación III.40:



**figura III.9.** sistema multicanal con filtros pasa banda isótropos.

Este modelo ofrece posibilidades semejantes a las indicadas para el descrito anteriormente, pero presenta diferencias que en algunas aplicaciones pueden convertirse en importantes ventajas, quizá la más destacable sea el reducido traslape entre la información contenida en las distintas bandas.



### III.5 FILTROS EN EL DOMINIO ESPACIAL

En esta sección se consideran las técnicas para filtrado de imágenes por convolución espacial, ello incluye filtros pasa baja y filtros pasa alta; el tipo de filtros discutidos en esta sección son clasificados dentro de los filtros de realce a diferencia de los filtros de reconstrucción; un filtro de reconstrucción intenta restaurar una imagen basado en algún conocimiento del fenómeno degradatorio, mientras que un filtro de realce intenta perfeccionar la calidad de una imagen para interpretabilidad humana o artificial, donde la calidad es cuantificada subjetivamente. La teoría de los Sistemas Lineales provee las bases matemáticas para ciertos filtros usados en Proceso Digital de Imágenes. Sea un sistema  $S$  considerado como una caja negra, con una entrada  $f(x)$  y una salida  $g(x)=S(f(x))$ :

$$f(x) \rightarrow S \rightarrow g(x)$$

donde  $f(x)$  es la función fuente,  $g(x)$  la función filtrada y  $S$  la operación de filtrado. El resultado requerido de la teoría de los sistemas lineales es que si un filtro satisface ciertas condiciones, es decir, si este es lineal e invariante en corrimiento, entonces la salida del filtro puede ser expresada matemáticamente en la forma simple:

$$g(x) = \int f(t) h(x-t) dt \quad \text{(III.41)}$$

donde  $h(t)$ , denominada función de punto de expansión o función de respuesta de pulso, es una función que completamente caracteriza el filtro. La expresión integral es comunmente llamada integral de convolución. En el caso digital, la integral está representada por una suma:

$$g(i) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(k) \cdot h(i-k) \quad \text{(III.42)}$$

y aunque los límites de la suma son infinitos, la función  $h$  es usualmente cero fuera de algún rango, como los ejemplos de la figura III.B. Si el rango sobre el cual  $h$  es diferente de cero es  $(-w, +w)$  la ecuación (III.42) puede ser escrita como:

$$g(i) = \sum_{k=i-w}^{i+w} f(k) \cdot h(i-k) \quad \text{(III.43)}$$

y  $g(i)$  puede ser interpretado como la salida que en el punto  $i$  está dada por una adición ponderada de pixels que rodean a  $i$ , donde los factores de ponderación están dados por  $h(k)$ .

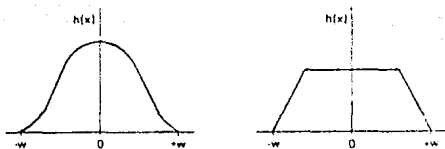


figura III.R. forma típica de función de distribución espacial.

Para crear la salida del siguiente pixel,  $g(i,j)$  la función  $h(k)$  es trasladada en uno y la suma ponderada es recalculada. La salida total es creada por una serie de operaciones de corrimiento multiplicación y adición y esto es llamado convolución espacial. En el caso bidimensional,  $h(k)$  es  $h(k,l)$  y la ecuación (III.43) es entonces una doble adición:

$$g(i,j) = \sum_{k=i-w}^{i+w} \sum_{l=j-w}^{j+w} f(i,l) \cdot h(i-l,j-l) \quad (\text{III.44})$$

Aquí nuevamente,  $g(i,j)$  es creada por una serie de corrimientos multiplicaciones y adiciones como lo esquematizado en el Apéndice A (procedimiento de convolución). Los valores de  $h$  son referidos también como núcleo de convolución. Por razones de simetría  $h(i,j)$  es por lo regular elegido a ser de dimensión  $m$  por  $n$  donde ambas son dimensiones impares, por lo general  $m$  igual a  $n$ .

En sistemas físicos el núcleo debe de ser no negativo, lo cual resulta con algún suavizamiento o promedio en la imagen. En Proceso Digital de Imágenes,  $h(i,j)$  puede ser definido arbitrariamente y esto da base a muchos tipos de filtros. De hecho, extendiendo la idea básica de convolución, los factores de ponderación de  $h$  pueden ser variados sobre la imagen, así como el tamaño y forma del mismo. Pero estas operaciones ya no son lineales ni tampoco convoluciones propiamente dichas, son sin embargo, operaciones de ventanas móviles. Generalmente, las técnicas de diseño unidimensional son usadas para calcular los coeficientes de los filtros bidimensionales; el filtro bidimensional de este tipo mas comunmente usado es la matriz de coeficientes de 3 por 3. Existen cerca de cien diferentes núcleos de entrada que tienen coeficientes conocidos para producir funciones de transferencia, análogas a las expuestas en el dominio de frecuencias de Fourier, para filtros genéricos pasa baja y pasa alta.

Si se define el área de una vecindad de 3 por 3 píxeles y un núcleo de convolución; utilizando notación matricial, una imagen  $f(x,y)$  y un núcleo  $h(k,l)$  con  $k,l=0,1,2$ , entonces el píxel central  $f(2,2)$  es reemplazado por la suma lineal de los puntos por los valores del núcleo:

$$\begin{aligned}
 g(2,2) = & f(1,1) \cdot h(0,0) + f(1,2) \cdot h(0,1) + \\
 & f(1,3) \cdot h(0,2) + f(2,1) \cdot h(1,0) + \\
 & f(2,2) \cdot h(1,1) + \\
 & f(2,3) \cdot h(1,2) + f(2,1) \cdot h(2,0) + \\
 & f(3,2) \cdot h(2,1) + f(3,3) \cdot h(2,2)
 \end{aligned}$$

La correlación espacial es un caso especial de la convolución en la que el núcleo definido es simétrico. Para convolucionar una imagen se repite esta operación en cada posición del píxel en la imagen. Es posible usar núcleos de convolución mayores con un patrón definido para detectar patrones similares en la imagen, en este caso el núcleo de convolución es llamado máscara y la operación realizada es realmente una correlación espacial. La detección usualmente involucra la amplificación de la característica deseada seguida por una decisión que se basa en un umbral de certidumbre.

La convolución de una área de dimensión  $N$  por  $M$  con un núcleo de dimensión  $k$  por  $l$  requiere de  $N$  por  $M$  por  $k$  por  $l$  multiplicaciones y un número aproximado de adiciones; entonces si la convolución es conceptualmente simple su implementación es complicada dado su excesivo cálculo aritmético [Apéndice A].

### Conclusión III

La información presentada en este capítulo es representativa de las técnicas comúnmente usadas en la práctica, para el realce de imágenes digitales. Los filtros definidos en las secciones III.2 y III.3 han sido generalizados con los criterios de porcentaje dispersión, presentados en la sección III.4, de tal forma que se tengan sistemas virtuales multicanal de filtros isotrópicos. La descripción analítica del filtro pasa banda isotrópico puede ser generalizado como una diferencia entre filtros butterworth o entre filtros exponenciales, sin embargo, se obtiene con ello un comportamiento similar al implementado con diferencias gaussianas.

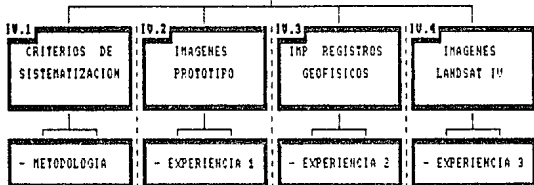
Existen además, un tipo de filtros denominados filtros pasa banda anisótropos, los cuales responden a anchos de banda específicos resaltando las frecuencias que los comprenden fuera del esquema de simetría radial, como el expuesto en las secciones III.2, III.3 y III.4. Sin embargo, la explotación íntegra del potencial de los filtros expuestos en dichas secciones está limitado actualmente y requieren de ser implementados sobre la totalidad bidimensional de la imagen en un ambiente interactivo auxiliado por el despliegue del espectro de Fourier a fin de realizar un análisis espectral más completo e interesante; con ello, la restauración de las imágenes dejaría de ser estrictamente analítica para ser más práctica y versátil. Para obtener un resultado final adecuado a un propósito específico, esto es, en función del tipo de imágenes a procesar.

Se ha cubierto una de las varias aplicaciones de la transformada de Fourier para el Proceso Digital de Imágenes; otras aplicaciones incluyen su uso en Reconstrucción, Codificación, Compresión, Análisis, Evaluación y cálculo de Descriptores Geométricos. Siempre que se usen métodos basados en análisis de Fourier, los mejores resultados son obtenidos cuando las consideraciones físicas del problema se adaptan de forma aceptable a un modelo de Fourier. Este es el caso cuando se tiene una perturbación mas o menos periódica que degrada la imagen, por esta razón los métodos de Fourier son empleados en imágenes de Astronomía, Microbiología, imágenes con una estructura repetitiva como cristales y por el estilo. En otros problemas, no es éste el caso, y la solución por Fourier puede dar resultados pobres. Por ejemplo, las imágenes de Percepción Remota no son usualmente filtradas con métodos de Fourier por que no hay una razón física para suprimir o resaltar ciertas frecuencias espectrales y para estas imágenes, los filtros que son usados son típicamente no lineales o los núcleos de éstos son pequeños y fácilmente implementados por convoluciones espaciales.

La sección III.5 fue presentada como una alternativa al concepto de convolución definido en el Capítulo II; sin embargo, dada la orientación de la presente tesis, los núcleos de convolución espacial referidos en el Apéndice A fueron utilizados brevemente para corroborar la equivalencia de los resultados obtenidos a partir del concepto de convolución expuesto. Entonces, la convolución espacial es equivalente a la multiplicación de la imagen y la función de transferencia en el dominio de las frecuencias espectrales, notando que el filtro a ser aplicado debe de ser lineal e independiente del contenido local de la imagen. En cualquier caso cuando se usó métodos de Fourier el filtro es evaluado directamente en el espacio de las frecuencias espectrales, y el problema se reduce al de la elección del filtro, la frecuencia de corte, el grado de atenuación y los parámetros de porcentaje de dispersión; lo cual generalmente es materia de ensayo y error. El éxito de un proceso de filtrado típicamente ocurre cuando una frecuencia espectral dependiente de ruido es removida de la imagen.

Un segundo uso de la transformada de Fourier en proceso de imágenes es en el desarrollo de correlación para identificación de patrones, así, la convolución y la correlación pueden ser calculadas más eficientemente utilizando el método de Fourier que el método directo en el dominio espacial; entonces esta opción de la transformada de Fourier no tiene ventajas conceptuales pero es estrictamente usada por eficiencia computacional.

**CAPITULO IV  
APLICACIONES**



<ul style="list-style-type: none"> <li>. nivel de computacion o calculo</li> <li>. nivel de algoritmo o proceso               <ul style="list-style-type: none"> <li>-puntual</li> <li>-por area</li> <li>-geometrico</li> <li>-por cuadro</li> <li>-dominio Fourier</li> </ul> </li> <li>. nivel de componentes fisicos o equipo               <ul style="list-style-type: none"> <li>-captacion y despliegue</li> <li>-procesadores integrados</li> <li>-proceso paralelo</li> </ul> </li> </ul> <p>paginas [97-101]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. definicion de la tarea visual</li> <li>. solucion de la tarea visual</li> <li>. equipo de proceso</li> </ul> <p>paginas [103-104]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. definicion de la tarea visual</li> <li>. solucion de la tarea visual</li> <li>. equipo de proceso</li> <li>. discusion</li> </ul> <p>paginas [105-106]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. definicion de la tarea visual</li> <li>. solucion de la tarea visual</li> <li>. equipo de proceso</li> <li>. discusion</li> </ul> <p>paginas [107-111]</p>
--	--	---	---

**CONCLUSION IV**

paginas [112-113]

## IV.1 CRITERIOS DE SISTEMATIZACION

El factor de complejidad y el costo económico de las aplicaciones de los sistemas de visión ha motivado la división del área de investigación básica y aplicada en dos líneas claramente diferenciadas. Por un lado se han impuesto condiciones en la escena para reducir el número de posibles variables y de esta forma disminuir la ambigüedad. Así, se ha logrado reducir los sistemas en una secuencia más o menos fija, en la que intervienen procesos claramente especificados que permiten ser implementados utilizando la tecnología actual a un costo no demasiado elevado. El segundo enfoque ha seguido un camino paralelo, pero más ambicioso, en el que se tratan de desarrollar sistemas capaces de poderse aplicar a escenas con pocas o ninguna restricción; aunque actualmente sólo son aplicables a dominios particulares.

Básicamente, ésta división representa la frontera entre el Proceso Digital de Imágenes o Visión Primaria y la Visión Artificial propiamente dicha. El Proceso Digital de Imágenes se caracteriza entonces por modelos que están guiados por los datos de la escena y por procesos de aplicación secuencial e independiente; los factores que facilitan su implementación son, un ambiente visual controlado y un modelo funcional simplificado.

Para integrar un sistema de visión capaz de efectuar funciones relacionadas a alguna aplicación específica, la base teórica implica el uso de un análisis sistemático del problema, dividido éste en tres niveles:

## Nivel de Computación o Cálculo

¿Cuáles son las funciones computacionales que un sistema visual debe de desarrollar?

o expresado de otra forma,

¿De qué cantidad de información puede prescindirse sin inconvenientes para la tarea visual específica?

En general los tres pasos jerárquicos del proceso de señales digitales son el preproceso, la extracción de características y el reconocimiento de patrones. Actualmente, la aplicación más ampliamente usada es el preproceso, éste grupo de operaciones trata principalmente con la calidad y corrección de las señales. En Proceso Digital de Imágenes, el preproceso incluye, aunque no está limitado a, ecualización, modificación espacial, relaciones de lógica booleana, corrección geométrica, correlación y reducción de ruido, etcétera. La mayoría de éstas funciones pueden ser realizadas por medio de operaciones lineales y filtros digitales.

## Nivel de Algoritmo o Proceso

### ¿Qué secuencia de procesos completa la función?

Los requerimientos de software para sistemas de proceso de imágenes son diferentes de aquellos para sistemas de propósito informático general. Para aplicaciones de video, es necesario desarrollar algún esfuerzo para que el software manipule los detalles complejos requeridos para una ejecución eficiente de los programas de proceso de imágenes. Típicamente, varias funciones diferentes son usadas en combinación en una tarea de inspección o evaluación dada. En términos genéricos éstas se clasifican en cuatro tipos de procesos. Proceso Puntual, Proceso por Área, Proceso Geométrico y Proceso por Cuadro; el Proceso en el Dominio de Frecuencia Espectral podría ser clasificado dentro del tipo de proceso por área, sin embargo, en el contexto de esta tesis, tiene una clasificación independiente:

#### Proceso Puntual.

Un algoritmo de proceso puntual rastrea la imagen entera y usa el valor del pixel y la dirección de cada punto para calcular un nuevo valor del mismo.

#### Proceso por Área.

El proceso por área utiliza la información en la vecindad del pixel para modificar el valor del mismo o para afirmar la existencia de alguna propiedad en los puntos de la imagen. Los procesos por área son empleados para filtrado espacial y para cambiar la estructura de la imagen.

#### Proceso Geométrico.

El proceso geométrico cambia el arreglo o disposición espacial de los pixels; utiliza ecuaciones para mapear los pixels de la imagen fuente a nuevas posiciones en la imagen destino. También se usa para corregir distorsiones geométricas causadas por el dispositivo óptico o para ampliar, trasladar, rotar alguna área de interés.

#### Proceso por Cuadro.

Son aquellos algoritmos que emplean la información de más de una imagen, generando una imagen modificada la cual es el resultado del proceso en puntos de localidades correspondientes unívocamente en el espacio.

#### Proceso en el Dominio Espectral de Fourier

Procesos de aplicación en el dominio espectral para filtrado, caracterización, codificación, interpolación y análisis espectral.



### Nivel de Componentes Físicos o Equipo

¿Cómo pueden los circuitos electrónicos ejecutar el algoritmo?

o más bien,

¿Cuál es el equipo apropiado para desarrollar la tarea visual?

El compromiso más importante a considerar en el diseño de un sistema de Proceso de Imágenes es el precio contra el funcionamiento. Las funciones de un sistema de visión artificial pueden ser implementadas lógicamente por software o físicamente por hardware. Generalmente, un sistema controlado por software tiene algunas ventajas con respecto al controlado por hardware; éste puede acceder pixels en cualquier orden, es relativamente más barato, más flexible, más interactivo, puede desarrollar virtualmente cualquier técnica en un tiempo aceptable y ser adaptado a alguna arquitectura en particular para desarrollar alguna aplicación específica. Sin embargo, el diseño basado en hardware es usualmente más rápido, más fácil de configurar y de usar pero está limitado a las funciones establecidas por el fabricante. Para lograr una razón óptima de precio y funcionamiento, es necesario disponer de la combinación apropiada de componentes de software y hardware. Planeación cuidadosa se requiere para que éstos diferentes niveles de potencia trabajen bien conjuntamente, una bien concebida jerarquía de procesadores y de equipo especializado, así como de los objetivos y límites del sistema a desarrollar, son necesarios para proveer un nivel de funcionamiento dado a un costo mínimo; así se tienen equipos que varían su grado de sofisticación, incrementando en consecuencia la razón precio funcionamiento:

#### Tarjetas de Captación y Despliegue

La más simple proposición en el proceso de imágenes es en la cual el procesador central desarrolla todas las funciones, utilizando un sistema estándar de video y una tarjeta digitalizadora para captar y desplegar imágenes en tiempo real, ésta tarjeta contiene un convertidor analógico digital, memoria suficiente para almacenar una imagen y un convertidor digital analógico. En un ambiente unitarea, donde el funcionamiento está determinado por el desarrollo del procesador central, el ancho de banda del bus anfitrión y la memoria de la interface digitalizadora.

## Tarjetas con Procesadores Integrados (Aceleradores)

El acelerador es una tarjeta electrónica que provee asistencia al equipo para ciertas funciones, empleando para ello circuitos lógicos dedicados o de propósito general. Los primeros involucran el uso de procesadores digitales de señales (DSP Digital Signal Processor), los cuales pueden estar basados en los cuatro siguientes principios:

a) Bloques Constructivos Genéricos (referidos como CISCs Complex Instruction Set Computing), acompañados por coprocesadores matemáticos, son la base más flexible y disponible; sin embargo, esta flexibilidad es inaceptable en precio y funcionamiento, así como en carencia de funcionalidad.

b) Bloques Constructivos de Función Específica, dispositivos de muy alta integración de proceso distribuido diseñados para tareas de proceso de señales, son la base más rápida con entradas claramente definidas; no obstante tales sistemas pueden ser costosos y carentes de flexibilidad en arquitectura y diseño del algoritmo.

c) Procesadores Digitales de Señales de tipo RISC (Reduced Instruction Set Computing), el desarrollo de software con esta base es comparativamente fácil, consta de dispositivos internos dedicados al proceso matemático junto con un robusto conjunto de comandos orientados; sin embargo, en ciertas aplicaciones los dispositivos de propósito general no se desarrollarán satisfactoriamente y serán necesarias ciertas especificaciones no implícitas en los mismos.

d) Procesadores de Aplicación Específica (denominados ASIC Application Specific Instruction Computing), su diseño permite adaptar la arquitectura del procesador digital para optimizar el funcionamiento, la confiabilidad, el espacio, la seguridad y costo; éstos pueden contemplar funciones periféricas, memoria, lógica aleatoria y eventualmente más de un procesador similar en un solo circuito integrado, entonces cada procesador digital de este tipo es optimizado para cierta área de aplicación.

Los circuitos de propósito general, proveen un ambiente flexible pero requieren de un amplio desarrollo en software por medio de compiladores cruzados que difícilmente explotan todas las capacidades del procesador, entonces este tipo de aceleradores depende completamente de los programas; como regla general, a mayor desarrollo hecho a nivel del circuito integrado mejor desempeño tendrá el sistema, una implementación inicial puede estar limitada a un conjunto de funciones residentes en el circuito.

### Proceso en Paralelo

En un contexto más amplio, la clasificación de arquitecturas paralelas se divide en dos grandes familias, las denominadas MIMD (Multiple Instructions Multiple Data), ello corresponde a la ejecución de programas diferentes con datos diferentes; ésta filosofía en diseño es sin embargo un predecesor de arquitecturas más avanzadas, las denominadas SIMD (Single Instruction Multiple Data), arquitectura en esencia sincrónica, en la cual se multiplican los órganos de tratamiento en vez de los procesadores completos así, todos los dispositivos de tratamiento son controlados de forma estrictamente idéntica por un dispositivo de control común.

La ejecución de un programa consiste entonces, en enviar cada una de sus instrucciones a los procesadores que la ejecutan simultáneamente con sus propios datos. Las aplicaciones que se prestan bien al tratamiento con máquinas SIMD son especiales, sin embargo, afectan a campos importantes como el de imágenes, el proceso de señales, la aeronáutica, la física nuclear, etcétera. De hecho, lo que caracteriza a estas aplicaciones es la organización espacial de los datos a tratar; por ejemplo, en Proceso Digital de Imágenes, la información básica está representada en pixels, por consiguiente, haciendo corresponder un procesador a cada pixel, se puede efectuar la misma operación en cada punto de la imagen al mismo tiempo.

No obstante, de contar con la simultaneidad, precisión, confiabilidad y velocidad de una computadora masivamente paralela, en el caso de la Visión Artificial no es la adecuación de algoritmos clásicos a las mismas, sino la adaptación de nuevos algoritmos, más óptimos y en esencia diferentes, que modelen, simulen y resuelvan de forma adecuada el problema específico de visión que afronten.

## Aplicaciones

A continuación se presentan tres casos en los que el autor del presente trabajo ha tenido experiencia; con aplicaciones distintas entre sí, pudiendo evaluar el potencial de las bases teóricas aprendidas y el de los procedimientos desarrollados en el transcurso de esta tesis:

La sección IV.2 expone de forma introductoria, el uso de imágenes modelo sobre las cuales se realizan procesos generales, principalmente para percatarse de los resultados que se obtienen al aplicar diferentes combinaciones de proceso digital; en un principio para suprimir ruido granular y posteriormente para definir contornos en las imágenes por medio de procesos de Fourier complementados con operaciones aritméticas de tipo espacial.

La sección IV.3 describe de manera general la fase inicial del presente trabajo de tesis, donde el autor tuvo la oportunidad de participar en un proyecto de investigación y desarrollo aplicado en el Instituto Mexicano del Petróleo en la División Geofísica de Explotación, a partir de la familiarización con el Proceso Digital de Imágenes, la noción de la arquitectura, del diseño y de la construcción de la tarjeta digitalizadora de video descrita en el Apéndice B y la integración del sistema en hardware y software para la aplicación específica descrita.

La sección IV.4 presenta en general la integración del Proceso Digital de Imágenes y la Percepción Remota; donde el autor procuró ampliar el ámbito de alcance y experiencia aplicada en imágenes de satélite, las cuales fueron cortesía del Centro Científico de IBM de México S.A.; evaluando con ello los límites prácticos de la teoría expuesta en esta tesis y notando la importante relación entre el proceso digital utilizado y el ambiente visual implicado.

## IV.2 IMAGENES PROTOTIPO

### Definición de la Tarea Visual (A)

El límite práctico de los parámetros fotointerpretativos en una imagen apropiadamente encodificada, es la presencia de ruido. El proceso de mejoramiento tal como filtrado, para perfeccionar la resolución de la imagen puede resaltar características sólo a expensas del total de la razón señal a ruido. Por estas razones, uno de los más importantes pasos en el Proceso Digital de Imágenes es la supresión de ruido, tal que los subsecuentes procesos de realce y restauración puedan ser ejecutados con la máxima razón señal a ruido, para llegar a resultados óptimos.

Muchas fuentes de ruido existen en sistemas de Proceso Digital de Imágenes y van desde ruido aleatorio, disparo de banda amplia (wideband shot), ruido termal, hasta ruido periódico. La separación precisa de cualquier ruido de video compuesto de un simple cuadro debe de estar basado en una o más características cuantificables de la señal de ruido que la distingue únicamente de otras componentes de video; sin embargo, en la mayoría de las situaciones reales se cuenta con información expresada de forma explícita, es decir, información digital de los varios componentes del total de la señal de video y entonces en el límite teórico, su separación es aproximada.

### Solución de la Tarea Visual

La esencia de la remoción de ruido de video, es aislar y remover los componentes varios e identificables tan rigurosamente como sea posible, tal que haga un mínimo de daño en los datos de video. En la mayoría de los casos, los errores introducidos a la señal real, varían de punto a punto y son imposibles de cuantificar significativamente, ya que muy poco se conoce en detalle acerca de la escena captada y la eficacia de la remoción depende de los datos.

La base teórica de esta tesis radica en procesos que utilizan filtros digitales en el dominio espectral de Fourier, por tanto, la aplicación general de estos sobre imágenes prototipo fue llevada a cabo para evaluar los resultados; variando frecuencias de corte, grados de atenuación, porcentaje y dispersión de ámbito. Con ello fue posible determinar el comportamiento y en casos generales el tipo de filtro apropiado para suavizar el ruido introducido a través del sistema de captación visual descrito en el Apéndice B. Sin embargo, estos criterios de selección de filtro no pueden ser aplicados a la generalidad de las imágenes y por tanto no pueden extenderse más allá de la aplicación particular para la cual fueron empleados.

## Equipo de Proceso

El dispositivo de proceso empleado, es una computadora personal, la interfaz digitalizadora es la especificada en el **Apéndice B**, y se encuentra clasificada como tarjeta de captación y despliegue. (es recomendable el coprocesador matemático para acelerar en lo posible la aplicación de procesos de punto flotante).

Dadas las características generales de equipo expuestas anteriormente, es necesario un análisis y diseño cuidadoso para poder desarrollar software apropiado a las limitantes del ambiente de una computadora personal, como lo son memoria RAM limitada y un microprocesador de arquitectura secuencial.

## Definición de la Tarea Visual (B)

Antes de que sea posible desarrollar tareas de Proceso de Imágenes de alto nivel, tal como reconocimiento de objetos, es necesario desarrollar varios pasos de preproceso para perfeccionar la calidad de la imagen, es decir, realizarla y varios procesos mas para aislar el objeto de interés del fondo, es decir, segmentarla. Usualmente la segmentación involucra por si misma múltiples pasos, tales como separación, basados en la intensidad, textura y contornos.

## Solución de la Tarea Visual

Con imágenes digitalizadas por una tarjeta TARGA TrueVision M8 con 256 tonos de gris y 512x512 pixels por líneas se realizaron procesos generales para mejorar la subjetiva calidad de las imágenes por medio de filtros de suavizamiento en el dominio de Fourier, para posteriormente a través de filtros de convolución en el dominio espacial definir los contornos de una línea de interés. La tarea visual supuesto fue la de segmentar la imagen para prepararla para un proceso de manipulación de contornos y así poder identificar y en términos generales manipular los objetos de interés.

## Equipo de Proceso

Dadas las características generales de equipo expuestas anteriormente, un análisis y diseño cuidadoso se requiere para poder desarrollar software que explote las virtudes y sobrepase las limitantes del ambiente de una computadora personal; el tipo de software desarrollado en esta tesis es compatible a los varios tipos de información visual digitalizada con la convención de que se encuentra en forma secuencial, es decir, un pixel tras otro que definen una línea, así por convención se posible manejar imágenes de  $m$  por  $n$  pixels por líneas.

### IV.3 DIGITALIZACION DE REGISTROS GEOFISICOS

#### Definición de la Tarea Visual

En la división de Geofísica del Instituto Mexicano del Petróleo, se planteó el problema de digitalizar registros geofísicos con un sistema de visión de circuito cerrado digital, donde la velocidad, la precisión y el costo fueran los factores a considerar para la solución del problema.

Las condiciones prácticas que se fueron dando en el transcurso del desarrollo, implicaban un problema no considerado; el dispositivo de captación visual, junto con la interface electrónica, proveían imágenes con ruido granular, el cual para una imagen idealmente binaria, esto es, la curva que representa el registro y el fondo que la contrasta, representaba una perturbación no deseada. El problema en sí, era la de filtrar dicho ruido, preservando la información de interés.

#### Solución de la Tarea Visual

La primera alternativa fue el empleo de la transformada de Fourier para filtrar los armónicos que definen el ruido granular; sin embargo, ello implicaba la consideración de dos factores relevantes, la precisión y la velocidad del proceso por cuadro. El sistema actual está implementado en base a una computadora convencional que en el mejor de los casos, esto es con auxilio de un coprocesador matemático, filtra la imagen en aproximadamente siete minutos y medio; con la idea de que un registro geofísico consta de varias cuadros o imágenes, el tiempo requerido para digitalizar el registro completo hubiese sido demasiado, por lo tanto ésta no fue la opción más apropiada.

Se optó por una alternativa que definiera la imagen de forma binaria por medio de alto contraste. La técnica seleccionada es un método de detección de regiones, el cual localiza conjuntos de píxeles semejantes, para ello es necesario disponer de alguna función que mida la semejanza entre píxeles, esta función se basa generalmente en sus niveles de gris. Detectar regiones por umbralización, es una técnica generalmente auxiliada por un histograma, el cual representa la distribución de frecuencias que corresponden a los niveles de gris de una imagen.

En escenas de escasa complejidad, como la que ofrecen los registros geofísicos, el histograma tiende a ser bimodal; es decir, aparecen dos zonas que representan la imagen u objeto y el fondo asociado. En casos como éste el procedimiento más rápido para segmentar la imagen consiste en aplicar un algoritmo que ejecute dos tareas:

Determinar el nivel de gris o Umbral que define una separación óptima de las dos partes del histograma. Obtener a partir de la imagen original  $f(x,y)$ , una imagen binarizada  $b(x,y)$ , con el siguiente criterio,

$$b(x,y) = \begin{cases} \text{Negro si } f(x,y) < \text{Umbral} \\ \text{Blanco si } f(x,y) \geq \text{Umbral} \end{cases}$$

De este modo se fragmenta la imagen en dos tipos de regiones, correspondiendo unas al registro y otras al fondo. La implementación actual se basa en este criterio, con ello se optimiza la velocidad de proceso.

#### Equipo de Proceso

Los componentes físicos del sistema de digitalización de registros geofísicos tienen la premisa de ser baratos y no contemplar más de lo necesario; el dispositivo de proceso es una computadora personal con prestaciones mínimas dado la particularización de su uso, la interface digitalizadora descrita en el **Apéndice B** esta clasificada como tarjeta de captación y despliegue al nivel de componentes físicos.

#### Discusión

La oportunidad de participar en el desarrollo de tecnología nacional, lo ha introducido a la metodología de investigación aplicada, al respecto: antes de iniciar un proyecto es necesario hacer un análisis de la factibilidad del mismo, es decir, contemplando el tiempo, el presupuesto, los recursos y los medios a emplear. Este análisis debe ser realizado de forma sistemática y ser documentado, a menudo es necesario un tipo de simulación especial que certifique la metodología para afrontar el problema en particular; entonces, variados atributos deben de poseer los investigadores de tecnología aplicada. Administrar, documentar, experimentar, analizar y tener la facultad de hacer aportaciones personales, todo ello corresponde a la realidad nacional en el ámbito de investigación aplicada, el cual, es enriquecido por investigación básica. El autor de esta tesis, agradece la oportunidad brindada, refiriéndose en especial al equipo de trabajo involucrado en el desarrollo del sistema descrito en esta sección.

<sup>1</sup> Un registro geofísico es una relación unidimensional que varía en función de la profundidad; dicha función representa información de las características del subsuelo y el contenido de la información depende del dispositivo de sensor; así, es posible registrar presión, temperatura, perfiles, respuestas espectrales de rayos gamma, etcétera, en pozos petrolíferos de exploración primaria.



## IV.4 LANDSAT IV

## Definición de la Tarea Visual

La Percepción Remota designa al conjunto de las técnicas utilizadas para obtener y analizar información relativa a objetos terrestres y distantes empleando la propiedad de las ondas electromagnéticas emitidas o reflejadas por esos objetos. La adquisición de datos se hace por medio de sensores, los cuales pueden ser: una cámara de toma de vista fija, aparatos de barrido y radar. Los sensores electromagnéticos de barrido analizan la superficie terrestre por medio de un espejo oscilatorio que capta la energía emitida o reflejada en una banda estrecha de terreno, perpendicular al eje de la órbita y cuyos extremos están definidos por el ángulo máximo de barrido.

La imagen de la superficie es entonces reproducida por el traslado del vector, la radiación emitida por la superficie incide en una celda detectora sensible a una longitud de onda determinada del espectro electromagnético, la señal eléctrica emitida por la celda es amplificada y registrada digitalmente. La información registrada y ligada a la energía electromagnética recibida por el sensor constituye una imagen; la curva de repartición de la energía emitida por cada objeto en función de la longitud de onda se conoce como firma espectral; cada objeto tiene en condiciones ideales, una firma espectral que lo caracteriza.

El tratamiento de datos tiene como fin extraer de la imagen la información relativa al área de interés y presentarla en forma utilizable; varias disciplinas se benefician de los datos proporcionados por la percepción remota: Geodesia, Geodinámica, Geofísica, Geología, Vulcanología, Glaciología, Oceanología, Cartografía, Mineralogía; así como la investigación Petrolífera, la Agricultura, la Silvicultura, la Hidrología y la Ecología; la teledetección permite además, analizar el impacto del hombre sobre la naturaleza: en la urbanización, industrialización, vías de comunicación, etcétera. También posibilita estudiar el impacto de fenómenos naturales o los que alteran la calidad de los recursos existentes, como plagas e incendios forestales.

Los Estados Unidos establecieron en 1972 un programa de gran cobertura denominado ERTS (Earth Resources Technology Satellite) cuya primera etapa fue el lanzamiento de la serie de satélites denominados Landsat. Más de 600 instituciones científicas en aproximadamente 130 países comparan y analizan sistemáticamente imágenes de sus territorios.

Las imágenes procedentes de estos satélites pueden ser obtenidas a través de INEGI o directamente del EROS Data Center en Sioux Falls, Dakota del Sur 57196 EE.UU. o a EOSAT 4300 Forbes Boulevard, Lanham, Maryland 20706 EE.UU. por un convenio suscrito a partir de noviembre de 1972. El uso de las imágenes de satélite en México se puede agrupar en cuatro categorías:

<b>Agropecuaria Forestal</b>	<b>Recursos Renovables</b>
<b>Hidrología</b>	<b>Recursos No Renovales</b>
<b>Mineralogía</b>	
<b>Cartografía</b>	<b>Administración y Planeación Ambiental</b>

### **Solución de la Tarea Visual**

La mayoría del proceso digital de imágenes ha sido dirigido para remover las distorsiones esperadas en la captación y en el mapeo sobre una referencia estandar con respecto a la tierra. Este proceso es un prerrequisito no sólo en la mayoría de las tareas de clasificación automática sino también de varios de los estudios convencionales de fotointerpretación.

La mayor parte del esfuerzo de programación requerido para afrontar los grandes arreglos de imágenes (al menos cuatro órdenes mayores que las aplicaciones convencionales), debe de ser desarrollado para materias conceptualmente triviales tales como: descomposición y reconstrucción de imágenes, rutinas eficientes de compresión y descompresión para varios modos de representación puntual, variaciones en las dimensiones de byte y de palabra entre diferentes máquinas, razón de aspecto y otros cambios de formato entre rastreadores, convertidores digital analógico, procesadores internos y dispositivos de salida, compatibilidad de discos y cintas, dispositivos de protección de almacenamiento para garantizar la preservación de valiosos originales sin redundancia, rutinas de diagnóstico que permiten la inspección de los valores actuales de segmentos relativamente pequeños en coordenadas definidas, etcétera.

La mayoría de las subrutinas son diseñadas para la definición de planos, máscaras, ventanas, operaciones lógicas de uno o más planos, operaciones en la vecindad, determinación de áreas y contornos, preparación de mosaicos, rastreo de conectividad, creación de figuras geométricas específicas, cuantificaciones de distancia, sobreimpresión en escala de gris, histogramas y normalización, sobreimposición de cuadrículas, traslación, rotación y reflexión, así como de un buen número de macro operaciones básicas diseñadas para facilitar la expansión de la librería de programas.

La disponibilidad de tales datos perfeccionados en conjunción con las bases de datos geográficos y más poderosos algoritmos para la extracción de la información hacen muy razonable considerar aplicaciones más allá de aquellas bajo consideración operacional por agencias usuarias.

## Equipo de Proceso

Las imágenes utilizadas en esta tesis son cortesía del Centro Científico de ISM y corresponden a imágenes captadas en 25/FEB/1985 por el sensor TMQ Thematic Mapper Device, se describen a continuación los parámetros del satélite Q de la serie ERTS, que porta dicho sensor:

### LandSat IV

Fecha de Lanzamiento Julio de 1982

#### Características orbitales:

Inclinación polar a 98.756°  
Tipo Circular, sincrónica al Sol  
697.5 kms perigeo  
700.9 kms apogeo  
Trayectoria de Norte a Sur, comprende las latitudes 80 Norte y 80 Sur  
Periodo de Recursión 18 días, circula la tierra cada 98.756 minutos aproximadamente 14 veces al día

#### Sistema de Adquisición de Datos LandSat IV:

#### TMQ Thematic Mapper Device

Estaciones Receptoras: Fairbanks, Alaska  
en EE.UU. Mojave, California y  
Rosman, North Carolina.

#### Parámetros del Sensor TMQ Thematic Mapper Device:

Dimensiones de Escena 185x185 Km (100x100 mill)

Bandas Espectrales	Longitud de onda	Región
1	[0.45,0.52) $\mu$ m	visible
2	[0.52,0.60) $\mu$ m	visible
3	[0.63,0.69) $\mu$ m	visible
4	[0.76,0.91) $\mu$ m	Infrarrojo cercano
5	[1.55,1.75) $\mu$ m	infrarrojo medio
6	[10.4,12.5) $\mu$ m	infrarrojo térmico
7	[11.0,12.75) $\mu$ m	infrarrojo medio

Exposición 10 ms/cuadro  
Telemetría P Lito (256 niveles de gris/banda)  
Resolución Espectra 100 m $\mu$  (14.6 bit/banda 5)  
Velocidad de Transmisión 15 Mbps en FDD

## Discusión

El uso del Proceso Digital de Imágenes en la Percepción Remota es un medio con el cual se complementa la interpretación y análisis de la información recopilada por sensores remotos. Las aplicaciones civiles están basadas en satélites de recursos naturales y satélites climatológicos principalmente, su rango en el espectro electromagnético y su resolución espacial difieren entre cada tipo de sensor, así, las aplicaciones varían no sólo con el sensor implicado, sino también con las bandas del espectro. El hecho de presentarse en siete diferentes bandas del espectro electromagnético implica especificar las bandas de interés para alguna aplicación en particular.

El contexto general del presente trabajo está limitado a la implementación de filtros digitales para restauración, donde por la naturaleza de la información visual captada se requiere de su aplicación; sin embargo, llevar tal filosofía al plano de imágenes compuestas por varias bandas, las cuales poseen características relativamente definidas y donde se procura que en todo momento se preserve la máxima relación señal a ruido (ámbito multispectral), no aporta un medio natural de tratar problemas generales; esto es, que para un pixel de una imagen del sensor descrito anteriormente el cual representa una área de  $900m^2$ , no tiene sentido promediarlo con su vecindad cuadrada (efecto similar al que se tendría con un filtro pasa baja el cual suaviza la información digital), pero si lo tiene el de resaltar contornos perdiendo el mínimo de información. Entonces, el uso de técnicas relacionadas con Fourier debe ser llevado a cabo por medio de filtros adaptativos en la aplicación de resaca de contornos preservando al máximo la resolución.

Una alternativa a la aplicación de la transformada de Fourier bidimensional sobre imágenes de sensores remotos es la correlación en el dominio espectral, donde es factible definir patrones de interés e identificarlos sobre el dominio espectral de cualquier banda; el éxito de este procedimiento está en función de la resolución espacial de las bandas captadas. Así, los datos estadísticos pueden ser analizados utilizando algoritmos en los dominios espectral, espacial y temporal complementado con el uso de datos de referencia.

#### Conclusión IV

Las operaciones de Proceso Digital de Imágenes, incluyen el realce en la calidad, análisis y codificación, haciendo posible alterar y modificar una imagen. Las técnicas de análisis están diseñadas para proveer valiosos datos sin cambiar la imagen. Conforme la tecnología y las capacidades de estos sistemas se expanden, los procedimientos de proceso de imágenes incrementarán su influencia y aplicación en diversos campos; así, diferentes técnicas pueden ser usadas para procesar una imagen:

El proceso óptico, para alterar imágenes empleando sus propiedades; por ejemplo, la manipulación analógica lograda por medio de lentes especiales o los procesos químicos de un cuarto oscuro, que pueden modificar o realzar imágenes para obtener una imagen más aceptable.

Las técnicas electrónicas para alterar las imágenes por medio analógico; por ejemplo, la modificación de la señal televisiva al cambiar el nivel de voltaje de la señal entrante alterando así la imagen, entonces la brillantez, el contraste y el color pueden ser modificados electrónicamente para proveer la imagen deseada.

Otra técnica electrónica es el Proceso Digital de Imágenes, la computadora es usada para identificar píxeles individuales como piezas separadas de información, la información está entonces en forma digital antes de que el ciclo de proceso y realce sea iniciado. Investigación automatizada y recurrente puede entonces ser enteramente llevada bajo el control de una computadora.

El Proceso Digital de Imágenes provee entonces un alto grado de interactividad entre el analista y la imagen. Sin embargo, los avances en equipo por sí mismos no garantizan la utilidad de un sistema de visión para proceso de imágenes, las imágenes no solo deben de ser captadas sino también interpretadas para ser útiles; este segundo requisito es la fuente de un mal entendido con respecto al proceso de imágenes, nominalmente que es muy complejo para ser útil.

Años de esfuerzo pasarán para proveer proceso de imágenes que pueda aproximarse al nivel de desarrollo del Sistema Visual Humano; pero lo que los usuarios potenciales de visión no advierten, es que no es necesario emular la complejidad de tal sistema en tareas tales como inspección, control de calidad, aplicaciones de seguridad, esto es por que las estructuras mecánicas y de iluminación pueden ser construidas para limitar las condiciones visuales, simplificando las demandas en los sistemas de visión, entonces el proceso de imágenes no es empleado para crear un sistema que vea e identifique una amplia variedad de objetos; en su lugar, el sistema es construido para satisfacer circunstancias particulares en un dominio visual específico:

## SALIDA

	IMAGEN	DESCRIPCION
E N T R A D A	IMAGEN	PROCESO DIGITAL DE IMAGENES
	DESCRIPCION	GRAFICAS POR COMPUTADORA
		VISION COMPUTACIONAL
		INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Esquema descriptivo del entorno operacional del Proceso Digital de Imágenes y áreas relacionadas.

**RUTINAS PARA PROCESO DIGITAL DE IMAGENES  
CODIGO FUENTE**

Un aspecto importante de un modelo computacional es la especificación precisa de la forma y contenido de las entradas y la información dependiente disponible en el proceso bajo investigación, también la forma y contenido de las salidas debe de ser precisamente especificada.

En el **Capítulo I** sección **I.4** se introdujo el concepto de modelo funcional simplificado, el cual define a una imagen digital como una función bidimensional, bivariable, que describe como la brillantez de cada punto en la imagen varía con respecto a su posición espacial; compilando en un solo pixel la información de los parámetros físicos que intervienen en el proceso de captación.

Si el modelo es verdaderamente preciso, lo suficiente para ser programado, el programa resultante es un artefacto finito, formal y experimental cuyo desarrollo puede ser total y cuantitativamente evaluado. Para el caso particular, no se requiere de hechos que dependan del dominio, mucho menos del razonamiento conciso, sino de procesos generalmente robustos cuyos resultados son confiables en un amplio rango de circunstancias naturales.

Así, las transformaciones lógicas, matemáticas, simbólicas y otras, útiles para producir la información procesada, deben de ser precisamente especificadas, así como las representaciones de datos intermedios en el proceso, por lo expuesto en el **Capítulo IV** sección **IV.1**, las rutinas a continuación presentadas se dividen en **[A] Rutinas de Proceso Funtual**, **[B] Rutinas de Proceso Espacial**, **[C] Rutinas de Proceso por Cuadro** y **[E] Rutinas en el Dominio Espectral de Fourier**.

Finalmente, cabe mencionar que dichas rutinas están diseñadas modularmente bajo el estándar **ANSI**, del comité de estandarización **X3J11**, basado en la definición sintáctica y semántica propuesta por **Brian W. Kernighan** y  **Dennis M. Ritchie**. Cada bloque de rutinas está precedido por un diagrama que esquemáticamente expresa el tipo de rutina implementada así como de un histograma que describe gráficamente el desarrollo de las rutinas clasificadas en cuanto a tiempo de ejecución en segundos, con equipos personales basados en arquitectura secuencial de la familia de procesadores **Intel 8088**.

Los procedimientos y funciones relacionadas con el acceso de imágenes a disco y a memoria, así como aquellos relacionados con el ambiente interactivo no están definidos en el presente apéndice. Las personas interesadas pueden hacer uso de las siguientes rutinas siempre y cuando mencionen la fuente y el autor.



[Inclusión de librerías prototipos provistos por el compilador]

#include <alloc.h> declara funciones para administración de memoria.

#include <conio.h> declara funciones para llamado a DOS de rutinas de control I/O.

#include <fcntl.h> define constantes simbólicas usadas en conexión con la rutina open.

#include <io.h> contiene estructuras y declaraciones para rutinas de bajo nivel para acceso I/O.

#include <math.h> declara prototipos para las funciones matemáticas; también define el macro HUGE\_VAL y declara estructuras de excepción usadas por las rutinas matherr.

#include <stdio.h> define tipos y macros necesarios para el paquete estándar de acceso I/O definido por Kernighan y Ritchie y extendido bajo el sistema UNIX V.

#include <string.h> declara rutinas para manipulación de cadenas y de memoria.

#include <sys\stat.h> define constantes simbólicas usadas para apertura y creación de archivos.

[Declaración de Constantes Enteras]

#define Ng 0x003f 1600.00mm de bytes/pixel precisión

#define Rx 0x0100 256 dimensión horizontal típica.

#define Ry 0x00EE 238 dimensión vertical típica.

#define Rc 0x0200 512 dimensión cuadrada.

#define Max 0xEE00 60.928 pixels/línea ó Rx\*Ey resolución espacial típica.

#define Li 0x0000 mínimo nivel de cuantificación.

[Declaración de Constantes Reales]

#define PI 3.14159265358979323846264338327950288419  $\pi$

#define P12 6.2831853071795864769252867665900576039  $2\pi$

#define P12C 39.47841760435743447533793399950460454126  $(2\pi)^2$

#define CTE1 0.41421356237309504880166872420969807856  $\sqrt{2}-1$

#define CTE2 -0.3465735903  $\ln(1/\sqrt{2})$

[Declaración de variables (tipos compuestos)]

```

typedef struct
{
    unsigned char x;      estructura básica pixel byte
} byteX;

typedef struct
{
    unsigned int  h,      cantidad del ensímo nivel de gris
                  t,      valor actualizado respectivo
                  e;      valor expandido respectivo
    double        p;      valor probabilidad respectivo
} histX;

typedef struct
{
    float x,             estructura de números complejos de
          y;             precisión sencilla (armónicos)
} cmplx;

typedef struct
{
    double c,           estructura de números complejos de
          s;           doble precisión
} trigX;                tabla trigonométrica

```

[Declaración de Variables Globales]

```

byteX      *bing1, *bing1i, *bing2, *bing2i;
cmplx      *bvect, *bvecti, *btabl, *btabli, *bproc, *bproci;
histX      *btbl1, *btbli;
trigX      *btrig, *btrigi;
char       *arch1, *arch2;

```

[Declaración de Núcleos para Convolución Espacial]

```

Laplaciano      -1 -2 -1      [0]
Divisor       : 10
Corrimiento    : 0
                -2 12 -2

Laplaciano      -1 -1 -1      [1]
Divisor       : 1
Corrimiento    : 0
                -1 9 -1

```

{Declaración de Núcleos para Convolución Espacial}

Laplaciano		-1	-1	-1	[2]
Divisor	: 1	-1	0	-1	
Corrimiento:	0	-1	-1	-1	
Laplaciano		0	-1	0	[3]
Divisor	: 1	-1	4	-1	
Corrimiento:	128	0	-1	0	
Direccional		0	-1	0	[4]
Divisor	: 1	0	0	0	
Corrimiento:	128	0	1	0	
Direccional		0	1	0	[5]
Divisor	: 1	0	0	0	
Corrimiento:	128	0	-1	0	
Direccional		0	0	0	[6]
Divisor	: 1	1	0	-1	
Corrimiento:	128	0	0	0	
Direccional		0	0	0	[7]
Divisor	: 1	-1	0	1	
Corrimiento:	128	0	0	0	
Direccional		0	0	1	[8]
Divisor	: 1	0	0	0	
Corrimiento:	128	-1	0	0	
Direccional		0	0	-1	[9]
Divisor	: 1	0	0	0	
Corrimiento:	128	1	0	0	
Direccional		1	0	0	[10]
Divisor	: 1	0	0	0	
Corrimiento:	128	0	0	-1	
Direccional		-1	0	0	[11]
Divisor	: 1	0	0	0	
Corrimiento:	128	0	0	1	
Promedio		1	2	1	[12]
Divisor	: 16	2	4	2	
Corrimiento:	0	1	2	1	
Promedio		0	1	0	[13]
Divisor	: 0	1	2	1	
Corrimiento:	0	2	1	0	
Promedio		0	1	0	[14]
Divisor	: 5	1	1	1	
Corrimiento:	0	0	1	0	

[Declaración de Núcleos para Convolución Espacial]

Direccional		5	5	5	[15]
Divisor	: 1	-3	0	-3	
Corrimiento:	128	-3	-3	-3	
Direccional		5	5	-3	[16]
Divisor	: 1	5	0	-3	
Corrimiento:	128	-3	-3	-3	
Direccional		5	-3	-3	[17]
Divisor	: 1	5	0	-3	
Corrimiento:	128	5	-3	-3	
Direccional		-3	-3	-3	[18]
Divisor	: 1	5	0	-3	
Corrimiento:	128	5	5	-3	
Direccional		-3	-3	-3	[19]
Divisor	: 1	-3	0	-3	
Corrimiento:	128	5	5	5	
Direccional		-3	-3	-3	[20]
Divisor	: 1	-3	0	5	
Corrimiento:	128	-3	5	5	
Direccional		-3	-3	5	[21]
Divisor	: 1	-3	0	5	
Corrimiento:	128	-3	-3	5	
Direccional		-3	5	5	[22]
Divisor	: 1	-3	0	5	
Corrimiento:	128	-3	-3	-3	
Línea		1	1	1	[23]
Divisor	: 1	0	0	0	
Corrimiento:	128	-1	-1	-1	
Línea		1	1	0	[24]
Divisor	: 1	1	0	-1	
Corrimiento:	128	0	-1	-1	
Línea		1	0	-1	[25]
Divisor	: 1	1	0	-1	
Corrimiento:	128	1	0	-1	
Línea		0	-1	-1	[26]
Divisor	: 1	1	0	-1	
Corrimiento:	128	1	1	0	
Línea		-1	-1	-1	[27]
Divisor	: 1	0	0	0	
Corrimiento:	128	1	1	1	

[Declaración de Núcleos para Convolución Espacial]

Línea		-1	-1	0	[28]
Divisor	: 1	-1	0	1	
Corrimiento:	128	0	1	1	
Línea		-1	0	1	[29]
Divisor	: 1	-1	0	1	
Corrimiento:	128	-1	0	1	
Línea		0	1	1	[30]
Divisor	: 1	-1	0	1	
Corrimiento:	128	-1	-1	0	
Gradiente		2	1	0	[31]
Divisor	: 1	1	0	-1	
Corrimiento:	128	0	-1	-2	
Gradiente		0	-1	-2	[32]
Divisor	: 1	1	0	-1	
Corrimiento:	128	2	1	0	
Gradiente		-1	-2	-1	[33]
Divisor	: 1	0	0	0	
Corrimiento:	128	1	2	1	
Gradiente		-2	-1	0	[34]
Divisor	: 1	-1	0	1	
Corrimiento:	128	0	1	2	
Gradiente		-1	0	1	[35]
Divisor	: 1	-2	0	2	
Corrimiento:	128	-1	0	1	
Gradiente		0	1	2	[36]
Divisor	: 1	-1	0	1	
Corrimiento:	126	-2	-1	0	
Ortogonal		1	1	1	[37]
Divisor	: 9	1	1	1	
Corrimiento:	0	1	1	1	
Ortogonal		1	$\sqrt{2}$	1	[38]
Divisor	: 1	0	0	0	
Corrimiento:	128	-1	$-\sqrt{2}$	-1	
Ortogonal		1	0	-1	[39]
Divisor	: 1	$\sqrt{2}$	0	$-\sqrt{2}$	
Corrimiento:	128	1	0	-1	

[Declaración de Núcleos para Convolución Espacial]

Ortogonal	0	-1	$\sqrt{2}$	[40]
Divisor : 1	1	0	-1	
Corrimiento: 128	$-\sqrt{2}$	1	0	
Ortogonal	$\sqrt{2}$	-1	0	[41]
Divisor : 1	-1	0	1	
Corrimiento: 128	0	1	$-\sqrt{2}$	
Ortogonal	0	1	0	[42]
Divisor : 1	-1	0	-1	
Corrimiento: 128	0	1	0	
Ortogonal	-1	0	1	[43]
Divisor : 1	0	0	0	
Corrimiento: 128	1	0	-1	
Ortogonal	1	-2	1	[44]
Divisor : 1	-2	4	-2	
Corrimiento: 128	1	-2	1	
Ortogonal	-2	1	-2	[45]
Divisor : 1	1	4	1	
Corrimiento: 128	-2	1	-2	

[Declaración de Prototipos tipo A]

```

void   andcimg_a ( unsigned );      rutinas lógicas
void   isocimg_a ( unsigned );
void   orcimg_a  ( unsigned );
void   xorcimg_a ( unsigned );
void   invimg_a  ( void );
void   ascimg_a  ( int );          rutinas aritméticas
void   mdcimg_a  ( float );
histx  *bloque_a ( void );        rutinas estadísticas
void   ecualizacion_a ( void );
void   expansion_a ( void );
void   vector_ecualizacion ( void );
void   vector_expansion ( unsigned, unsigned );
void   vector_histograma ( void );
void   vector_probabilidad ( void );
    
```

[Declaración del Prototipo tipo B]

```

void convimg_b ( nucleo, Nx, My, div, corr ); rutina
                                                aritmética
    
```

### [Declaración de Prototipos tipo C]

```
void andimg_c ( void );           rutinas lógicas
void isoimg_c ( void );
void orimg_c ( void );
void subimg_c ( void );
void supimg_c ( void );
void xorimg_c ( void );

void addimg_c ( void );           rutinas aritméticas
void primg_c ( void );
void susimg_c ( void );
```

### [Declaración de Prototipos tipo E]

```
cmplx *bloque_e ( unsigned );    rutinas en el dominio
trigx *bloque_t ( void );        de frecuencias
void conjuga_e ( void );         espectrales de
void fourier_e ( void );         Fourier
void fescala_e ( void );
void recupera_e ( void );
void tabtrig_e ( void );
void traslone_e ( void );
void transp_e ( void );
```

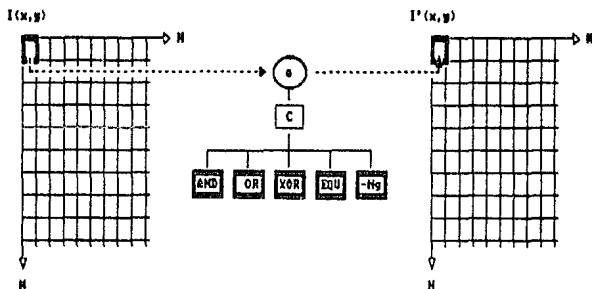
### Filtros Espectrales

```
void ideal_baja ( double );
void parabolica_baja ( double, double, double );
void butterworth_baja ( double, double, double );
void exponencial_baja ( double, double, double );
void gaussiano_baja ( double, double, double );
void trapezoidal_baja ( double, double );
void rampa_baja ( double );
```

```
void ideal_alta ( double );
void parabolica_alta ( double, double, double );
void butterworth_alta ( double, double, double );
void exponencial_alta ( double, double, double );
void gaussiano_alta ( double, double, double );
void trapezoidal_alta ( double, double );
void rampa_alta ( double );
```

```
void pluggsrand(double,double,double,double,double,double);
void align_banda ( double, double, double, double );
void pos_banda ( double, double, double );
```

PROCEDIMIENTOS<sup>M</sup> LABORES TIPO A



AND, OR, XOR, EQU REPRESENTAN OPERADORES LOGICOS QUE ACTUAN BAJO LAS REGLAS DEL ALGEBRA DE BOOLE, CON RESPECTO A C.

-Ng IMPLICA LA DIFERENCIA DEL PIXEL RESPECTIVO CON RESPECTO AL MAXIMO NIVEL DE GRIS, RESULTANDO UNA IMAGEN NEGATIVA O INVERSA.

$I(x,y)$  ES LA IMAGEN FUENTE Y

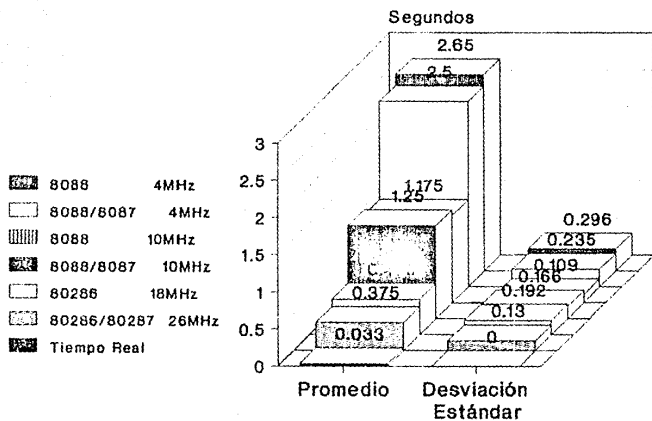
$I'(x,y)$  LA IMAGEN DESTINO, PARA TODA  $x = 0, 1, \dots, M$   
 $y = 0, 1, \dots, M$

M, N SON LAS DIMENSIONES HORIZONTAL Y VERTICAL DE LA IMAGEN, RESPECTIVAMENTE.

<sup>M</sup> ESTOS PROCEDIMIENTOS SON OPTIMIZABLES POR MEDIO DE TABLAS DE REFERENCIA.



## Proceso Puntual operaciones lógicas



[Definición de rutinas tipo A]

Función : realiza AND lógico puntual de imagen.  
 Prototipo : void andcimg\_a (unsigned)  
 Notas : resultado asignado en el área 2. operación unaria.  
 Pseudocódigo :  $pixel2 = pixel1 \text{ AND } \text{factor\_de\_referencia}$

```
void andcimg_a (m)
unsigned      m;
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x = (bimg1+j)->x & m;
}
```

Función : realiza comparación lógico puntual de imagen resaltando equivalencia.  
 Prototipo : void isocimg\_a (unsigned)  
 Notas : resultado asignado en el área 2. operación unaria. fondo negro.  
 Pseudocódigo :  $pixel2 = (\text{si } pixel1 = \text{factor\_de\_referencia})$

```
                2 pixel1
                : Mínimo_Nivel_de_Gris

void isocimg_a (m)
unsigned      m;
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x = ( (bimg1+j)->x == m ) ? (bimg1+j)->x
                : Li;
}
```

Función : realiza OR lógico puntual de imagen.  
 Prototipo : void orcimg\_a (unsigned)  
 Notas : resultado asignado en el área 2. operación unaria.  
 Pseudocódigo :  $pixel2 = pixel1 \text{ OR } \text{factor\_de\_referencia}$

```
void orcimg_a (m)
unsigned      m;
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x = (bimg1+j)->x | m;
}
```

[Definición de rutinas tipo A]

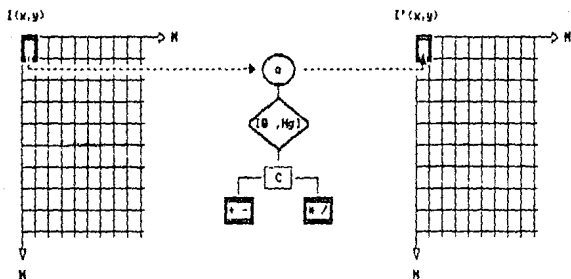
**Función** : realiza XOR lógico puntual de imagen.  
**Prototipo** : void xorimg\_a (unsigned)  
**Notas** : resultado asignado en el área 2, operación unaria.  
**Pseudocódigo** : pixel2 = pixel1 XOR factor de referencia

```
void xorimg_a (m)
unsigned      m;
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x = (bimg1+j) ^x ^ m;
}
```

**Función** : realiza inversión lógica puntual de imagen.  
**Prototipo** : void invimg\_a (void)  
**Notas** : resultado asignado en el área 2, operación unaria.  
**Pseudocódigo** : pixel2 = Máximo Nivel de Gris - pixel1

```
void invimg_a (void)
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x = Hq - (bimg1+j) ^x;
}
```

PROCEDIMIENTOS<sup>a</sup> ARITMETICOS TIPO A










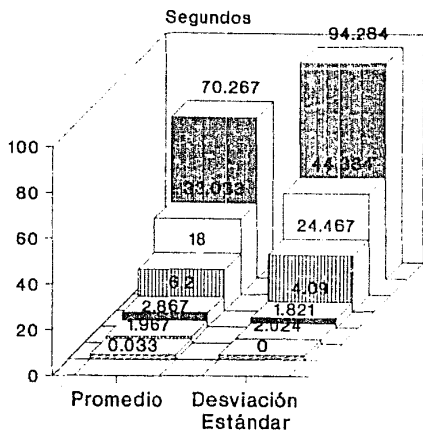
- + , - REPRESENTAN OPERADORES ARITMETICOS DE ADICION Y DE SUBTRACCION CON RESPECTO A UNA CONSTANTE REAL.
- m , / SON OPERADORES DE MULTIPLICACION Y DIVISION CON RESPECTO A UNA CONSTANTE REAL.
- $(0, Mg)$  CONDICIONA EL VALOR RESULTANTE AL RANGO DEFINIDO.
- $I(x,y)$  ES LA IMAGEN FUENTE Y
- $I'(x,y)$  LA IMAGEN DESTINO, PARA TODA  $x = 0, 1, \dots, M$   
 $y = 0, 1, \dots, M$
- $M, M$  SON LAS DIMENSIONES HORIZONTAL Y VERTICAL DE LA IMAGEN, RESPECTIVAMENTE.

<sup>a</sup> ESTOS PROCEDIMIENTOS SON OPTIMIZABLES POR MEDIO DE TABLAS DE REFERENCIA.

# Proceso Puntual

## operaciones aritméticas

	8088	4MHz
	8088	10MHz
	80286	18MHz
	8088/8087	4MHz
	8088/8087	10MHz
	80286/80287	26MHz
	Tiempo Real	



[Definición de rutinas tipo A]

**Función** : realiza adición/substracción puntual de imagen.  
**Prototipo** : void ascimg\_a (int)  
**Notas** : resultado asignado en el área 2. operación unaria, cuida sobreflujo.  
**Pseudocódigo** :  $pixel2 = pixel1 \pm factor\_de\_referencia$

```
void ascimg_a (m)
int m;
{
    register unsigned j;
    int t;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
    {
        t = (bimg1+j)->x + m;
        if( t > Ng ) t = Ng;
        if( t < Li ) t = Li;
        (bimg2+j)->x = (unsigned) t;
    }
}
```

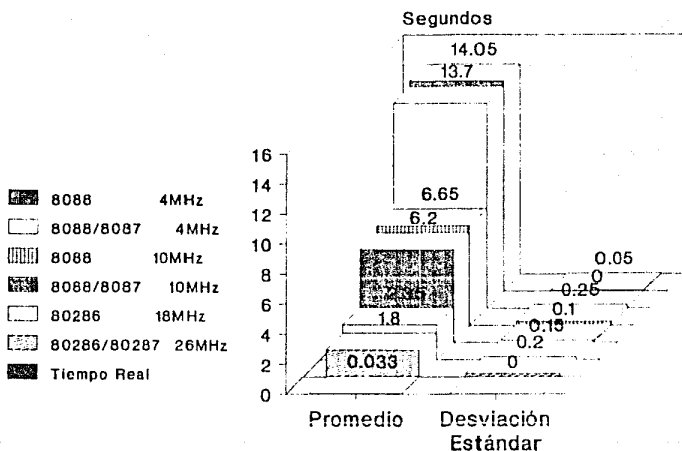
**Función** : realiza corrimiento lineal abriglantando u oscureciendo la imagen.  
**Prototipo** : void mdcimg\_a (float)  
**Notas** : resultado asignado en el área 2. operación unaria, cuida sobreflujo.  
**Pseudocódigo** :  $pixel2 = pixel1 * factor\_de\_referencia$

```
void mdcimg_a ( m )
float m;
{
    register unsigned j;
    unsigned char t;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
    {
        t = (bimg1+j)->x * m;
        (bimg2+j)->x = ( t > Ng ) ? Ng : t;
    }
}
```



# Proceso Puntual

## operaciones estadísticas





[Definición de rutinas tipo A]

**Función** : reserva área de memoria fija con estructura tipo histx.  
**Prototipo** : histx \*bloque\_a (void)  
**Notas** : reserva un bloque de (Ng+1)\*sizeof(histx) bytes en la pila de memoria, en caso positivo la función regresa el apuntador del área reservada, en caso negativo regresa NULL.

```
histx *bloque_a (void)
{
    return( (histx*) malloc((Ng+1) * sizeof(histx)) );
}
```

**Función** : realiza la linearización por histograma.  
**Prototipo** : void equalizacion\_a (void)  
**Notas** : resultado asignado en el área 2, operación unaria, toma como referencia al vector de equalización, direccionamiento alterno en pseudocódigo.

**Pseudocódigo** : btb11 += (bimg1+i)->x;  
(bimg2+i)->x = btb11->t;

```
void equalizacion_a (void)
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
    {
        btb11 = btb11i;
        (bimg2+j)->x = (btb11+((bimg1+j)->x))->t;
    }
}
```

**Función** : realiza la expansión de los niveles de cuantificación.  
**Prototipo** : void expansion\_a (void)  
**Notas** : resultado asignado en el área 2, operación unaria, toma como referencia al vector de expansión, direccionamiento alterno en pseudocódigo.

**Pseudocódigo** : btb11 += (bimg1+i)->x;  
(bimg2+i)->x = btb11->x;

```
void expansion_a (void)
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
    {
        btb11 = btb11i;
        (bimg2+j)->x = (btb11+((bimg1+j)->x))->x;
    }
}
```

[Definición de rutinas tipo A]

**Función** : calcula el vector de linealización.  
**Prototipo** : void vector\_igualizacion (void)  
**Notas** : toma como referencia el vector de probabilidad y el nivel máximo de cuantificación, genera vector virtual de acumulación.

```
void vector_igualizacion (void)
{
    register unsigned j;
    double adc=0.0;
    btbl1 = btbl1i;
    for ( j=0; j<=Ng; j++ )
    {
        adc += (btbl1+j)->p;
        (btbl1+j)->t = (unsigned) (adc * Ng);
    }
}
```

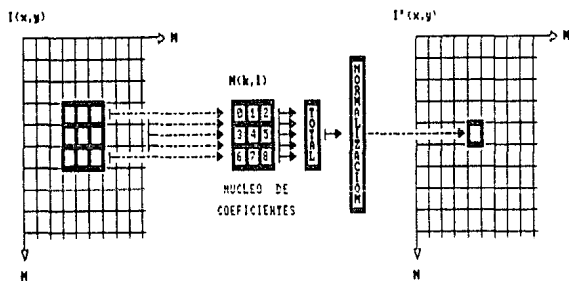
**Función** : calcula el vector de expansión con los umbrales establecidos.  
**Prototipo** : void vector\_expansion (unsigned,unsigned)  
**Notas** : condicionado a: parámetro1 & parámetro2.

```
void vector_expansion (a,b)
unsigned a, b;
{
    register unsigned j;
    double paso=0.0, valor=0.0;

    btbl1 = btbl1i;
    paso = (double) Ng/(a-b+1);
    for ( j=0; j<b; j++ )
        (btbl1+j)->e = 0;
    for ( j=b; j<=a; j++ )
    {
        (btbl1+j)->e += (unsigned) valor;
        valor += paso;
    }
    for ( j=a+1; j<=Ng; j++ )
        (btbl1+j)->e = Ng;
}
```



PROCEDIMIENTO ARITMETICO TIPO B



$M(k,l)$  ES EL NUCLEO DE CONVULSION ESPACIAL DE  $3 \times 3$ , DONDE,  $k,l = 0, 1, 2$

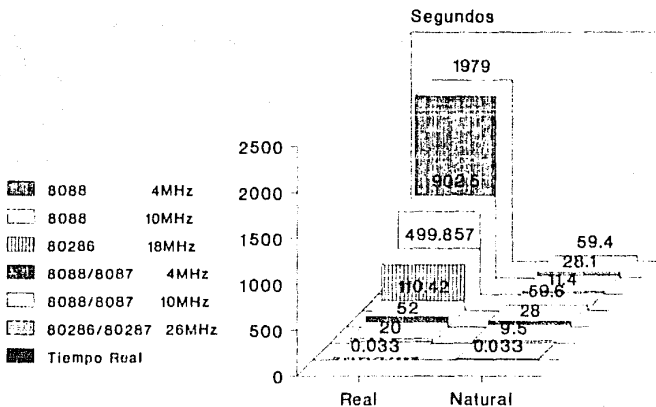
**TOTAL** ES LA ADICION PONDERADA DEFINIDA DENTRO DEL RANGO  $(0, M_y)$ .

$I(x,y)$  ES LA IMAGEN FUENTE Y

$I'(x,y)$  LA [IMAGEN DESTINO, PARA TODA  $x = 0, 1, \dots, M$   
 $y = 0, 1, \dots, M$

$M, M$  SON LAS DIMENSIONES HORIZONTAL Y VERTICAL DE LA IMAGEN, RESPECTIVAMENTE.

## Proceso por Area convolución espacial



[Definición de la rutina tipo B]

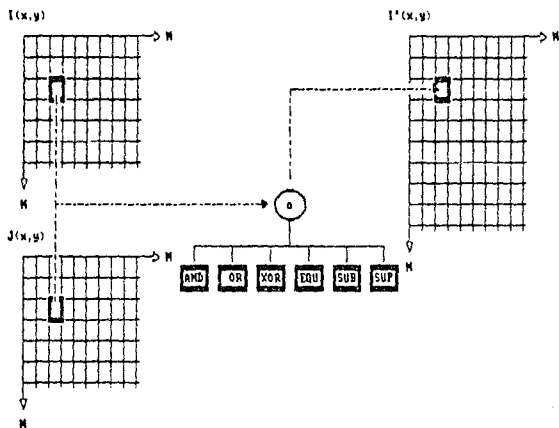
Función : realiza convolución espacial de imagen.  
 Prototipo : void convimg\_b (float \*,int,int,int,int)  
 Notas : resultado asignado al área 2. núcleos  
 estáticos de coeficientes variables  
 definidos de forma global. versión adaptable  
 a uso de núcleos con coeficientes reales.

```
void convimg_b (nucleo,Nx,My,divisor,corrimiento)
float          *nucleo;
int Nx, My, divisor, corrimiento;
{
    register unsigned j, i, ix, l, k, kk=1;
    float          suma;

    bimg1 = bimg1i;
    bimg2 = bimg2i+Rx;

    for( j=2; j<=Ry; j++ )
    {
        for( i=0; i<=(Rx-Nx); i++ )
        {
            suma = 0;
            ix = 0;
            for( l=0; l<Nx; l++ )
            {
                for( k=0; k<My; k++ )
                    suma+=((bimg1+k+(l*Rx)+i)->x*nucleo[ix++]);
            }
            suma /= divisor;
            suma += corrimiento;
            suma = ( suma < Li ) ? Li : suma;
            suma = ( suma > Ng ) ? Ng : suma;
            (Limg2+i+1)->x = (unsigned) suma;
        }
        bimg2 = bimg2i+(Rx*j);
        bimg1 = bimg1i+(Rx*kk);
        kk++;
    }
}
```

PROCEDIMIENTOS LOGICOS TIPO C



**AND, OR, XOR, EQU** REPRESENTAN OPERADORES LOGICOS QUE ACTUAN BAJO LAS REGLAS DEL ALGEBRA DE BOOLE.

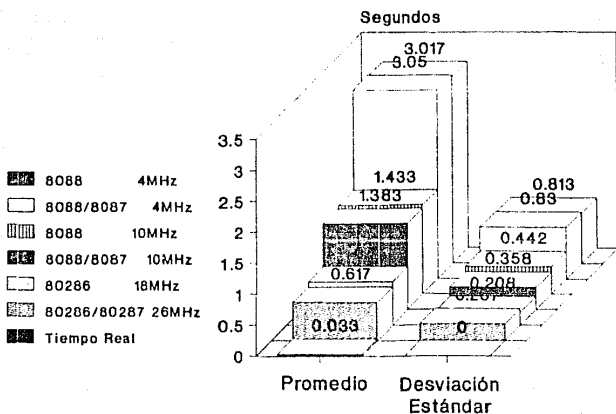
**SUB, SUP** SON OPERADORES RELACIONALES QUE SUB O SOBREPONEN IMAGENES.

**$I(x,y)$ ,  $J(x,y)$**  SON OPERANDOS QUE SE RELACIONAN EN UNA FUNCION DE FORMA BINARIA,

**$I'(x,y)$**  LA IMAGEN DESTINO, PARA TODA  $x = 0, 1, \dots, M$   
 $y = 0, 1, \dots, N$

**$M, N$**  SON LAS DIMENSIONES HORIZONTAL Y VERTICAL DE LAS IMAGENES, RESPECTIVAMENTE.

## Proceso por Cuadro operaciones lógicas





[Definición de rutinas tipo C]

**Función** : realiza AND lógico de imágenes en correspondencia espacial lineal.  
**Prototipo** : void andimg\_c (void)  
**Notas** : resultado asignado en el área 2. operación binaria.  
**Pseudocódigo** : pixel2 = pixel1 AND pixel2

```
void andimg_c (void)
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x &= (bimg1+j)->x;
}
```

**Función** : realiza comparación de imágenes en correspondencia espacial lineal resaltando equivalencias.  
**Prototipo** : void isoimg\_c (void)  
**Notas** : resultado asignado en el área 2. operación binaria. fondo negro.  
**Pseudocódigo** : pixel2 = (si pixel1 = pixel2

2 pixel1  
: Mínimo Nivel de Gris

```
void isoimg_c (void)
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x = ((bimg1+j)->x == (bimg2+j)->x )
                        ? (bimg1+j)->x
                        : 0;
}
```

**Función** : realiza OR lógico de imágenes en correspondencia espacial lineal.  
**Prototipo** : void orimg\_c (void)  
**Notas** : resultado asignado en el área 2. operación binaria.  
**Pseudocódigo** : pixel2 = pixel1 OR pixel2

```
void orimg_c (void)
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x |= (bimg1+j)->x;
}
```

[Definición de rutinas tipo C]

**Función** : realiza la más baja correspondencia en correspondencia espacial lineal.  
**Prototipo** : void subimg\_c (void)  
**Notas** : resultado asignado en el área 2. operación binaria, operación conmutativa.  
**Pseudocódigo** : pixel2 = (si pixel2 < pixel1) ? pixel2 : pixel1

```
void subimg_c (void)
{
    register unsigned i;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x = ((bimg2+j)->x < (bimg1+j)->x)
            ? (bimg2+j)->x
            : (bimg1+j)->x;
}
```

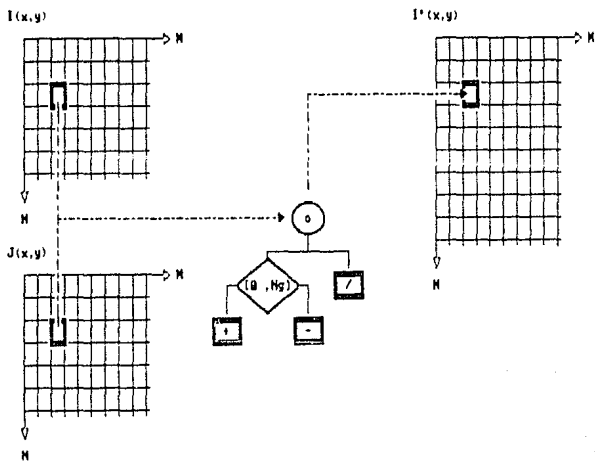
**Función** : realiza la más alta correspondencia en correspondencia espacial lineal.  
**Prototipo** : void supimg\_c (void)  
**Notas** : resultado asignado en el área 2. operación binaria, operación conmutativa.  
**Pseudocódigo** : pixel2 = (si pixel2 > pixel1) ? pixel2 : pixel1

```
void supimg_c (void)
{
    register unsigned i;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x = ((bimg2+j)->x > (bimg1+j)->x)
            ? (bimg2+j)->x
            : (bimg1+j)->x;
}
```

**Función** : realiza AND lógico de imágenes en correspondencia espacial lineal.  
**Prototipo** : void xorimg\_c (void)  
**Notas** : resultado asignado en el área 2. operación binaria.  
**Pseudocódigo** : pixel2 = pixel1 XOR pixel2

```
void xorimg_c (void)
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x ^= (bimg1+j)->x;
}
```

PROCEDIMIENTOS ARITMETICOS TIPO C



+, -

SON OPERADORES ARITMETICOS CONMUTATIVOS DE ADICION Y SUSTRACCION CERRADA.

/

ES EL PROMEDIO ESPACIAL DE DOS IMAGENES.

$I(x,y)$ ,  $J(x,y)$

SON OPERANDOS QUE SE RELACIONAN EN UNA FUNCION DE FORMA BINARIA.

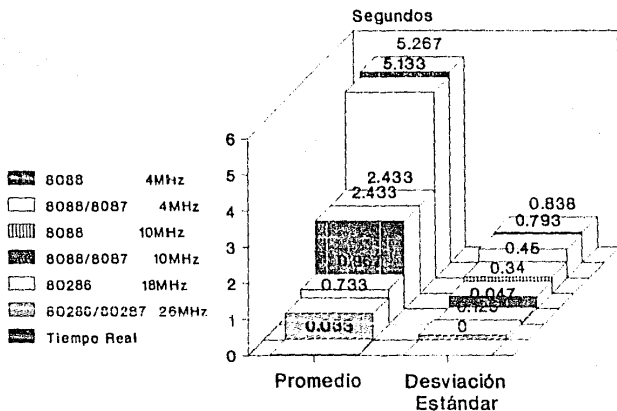
$I'(x,y)$

LA IMAGEN DESTINO, PARA TODA  $x = 0, 1, \dots, M$   
 $y = 0, 1, \dots, N$

M, N

SON LAS DIMENSIONES HORIZONTAL Y VERTICAL DE LAS IMAGENES, RESPECTIVAMENTE.

## Proceso por Cuadro operaciones aritméticas



[Definición de rutinas tipo C]

**Función** : realiza adición aritmética de imágenes en correspondencia espacial lineal.  
**Prototipo** : `void addimg_c (void)`  
**Notas** : resultado asignado en el área 2, operación binaria, ruido reflejado.  
**Pseudocódigo** : `pixel2 = pixel1 + pixel`

```
void addimg_c (void)
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x = (((bimg2+j)->x) + (bimg1+j)->x) > Ng
        ? Ng
        : (bimg2+j)->x;
}
```

**Función** : realiza promedio aritmético de imágenes en correspondencia espacial lineal.  
**Prototipo** : `void prmimg_c (void)`  
**Notas** : resultado asignado en el área 2, operación binaria.  
**Pseudocódigo** : `pixel2 = (pixel1 + pixel3)/2`

```
void prmimg_c (void)
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
    {
        (bimg2+j)->x += (bimg1+j)->x;
        (bimg2+j)->x /= 2;
    }
}
```

**Función** : realiza sustracción aritmética de imágenes en correspondencia espacial lineal.  
**Prototipo** : `void susimg_c (void)`  
**Notas** : resultado asignado en el área 2, operación binaria, operación conmutativa, dilatación absoluta.  
**Pseudocódigo** : `pixel2 = |pixel2 - pixel1|`

```
void susimg_c (void)
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x = ((bimg2+j)->x < (bimg1+j)->x)
        ? (bimg1+j)->x - (bimg2+j)->x
        : (bimg2+j)->x - (bimg1+j)->x;
}
```

[Definición de rutinas tipo C]

**Función** : realiza adición aritmética de imágenes en correspondencia espacial lineal.

**Prototipo** : void adcing\_c (void)

**Notas** : resultado asignado en el área 2, operación binaria, cuida sobreflujo.

**Pseudocódigo** :  $pixel2 = pixel1 + pixel2$

```
void adcing_c (void)
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x = (((bimg2+j)->x) + (bimg1+j)->x) > Ng
            ? Ng
            : (bimg2+j)->x;
}
```

**Función** : realiza promedio aritmético de imágenes en correspondencia espacial lineal.

**Prototipo** : void prming\_c (void)

**Notas** : resultado asignado en el área 2, operación binaria.

**Pseudocódigo** :  $pixel2 = (pixel1 + pixel2)/2$

```
void prming_c (void)
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (
            (bimg2+j)->x += (bimg1+j)->x;
            (bimg2+j)->x /= 2;
        )
}
```

**Función** : realiza sustracción aritmética de imágenes en correspondencia espacial lineal.

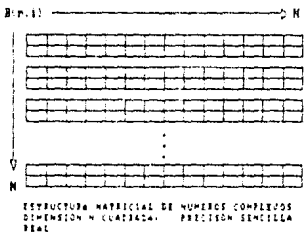
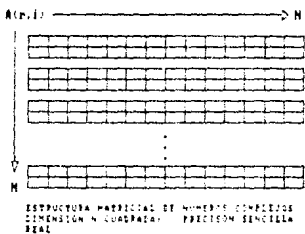
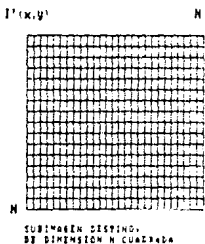
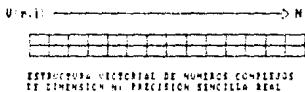
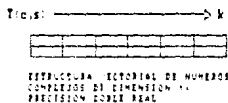
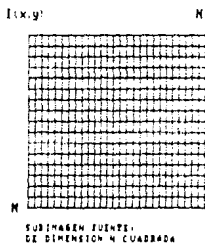
**Prototipo** : void susimg\_c (void)

**Notas** : resultado asignado en el área 2, operación binaria, operación conmutativa, diferencia absoluta.

**Pseudocódigo** :  $pixel2 = |pixel1 - pixel2|$

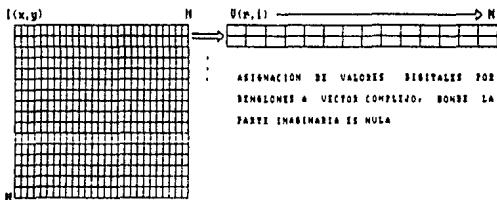
```
void susimg_c (void)
{
    register unsigned j;
    for ( j=0; j<dt; j++ )
        (bimg2+j)->x = ((bimg2+j)->x < (bimg1+j)->x)
            ? (bimg1+j)->x - (bimg2+j)->x
            : (bimg2+j)->x - (bimg1+j)->x;
}
```

ESTRUCTURAS BASICAS EN EL DOMINIO DE FRECUENCIAS ESPECTRALES

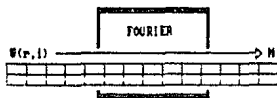


$M = 2^i$  DIMENSION DE LA SUBIMAGEN Y AFEROSOS AUXILIARES  
 $k = \ln_2 M$  DIMENSION DEL VECTOR COMPLEJO DE PRECISION DOBLE

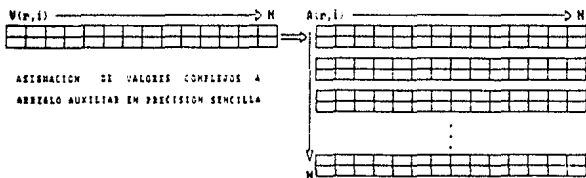
**TRANSFORMADA BIDIMENSIONAL DE FOURIER  
EN BASE A TRANSFORMACIONES UNIDIMENSIONALES**



PROCEDIMIENTO NECESARIO PARA UBICAR LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL CENTRADA RESPECTO A  $M$ : LA MITAD DEL PERIODO

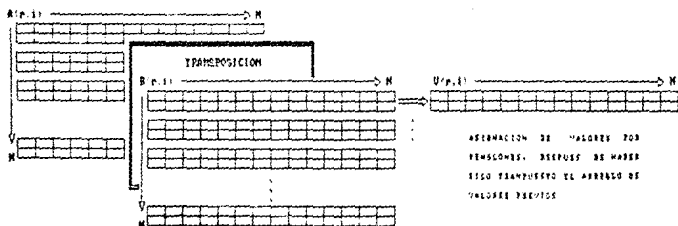


TRANSFORMACION TRIGONOMETRICA UNIDIMENSIONAL ALGORITMO IN PLACE DE J.W.CODLEY Y J.W.FURZY PROCESO EN DOBLE PRECISION, POR SEÑALES

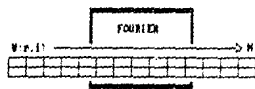




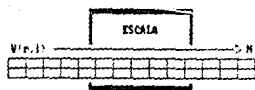
TRANSFORMADA BIDIMENSIONAL DE FOURIER  
EN BASE A TRANSFORMACIONES UNIDIMENSIONALES



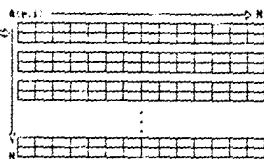
PROCEDIMIENTO NECESARIO PARA CENTRAR LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL, CENTRADA RESPECTO A  $M/N$  LA MITAD DEL PERIODO



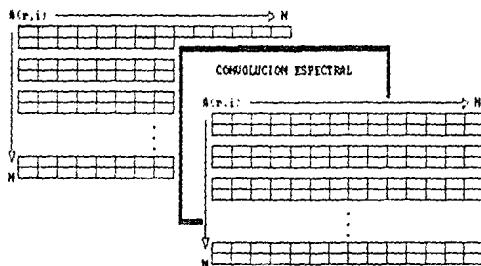
TRANSFORMACION TRIGONOMETRICA UNIDIMENSIONAL ALGORITMO EN PLACE DE J.W. COOLEY & J.W. TUCKER PROCESO EN DOBLE PRECISION, POR COLUMNAS



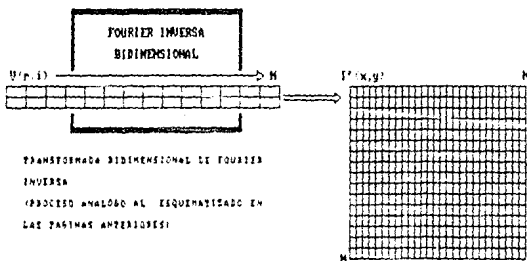
ASIGNACION DE VALORES CONSTANTES EN ESCALA AL ARREGLO ANTERIOR EN PRECISION SENCILLA



**TRANSFORMADA BIDIMENSIONAL DE FOURIER  
EN BASE A TRANSFORMACIONES UNIDIMENSIONALES**



APLICACION DE FILTROS EN EL DOMINIO DE LAS FRECUENCIAS ESPACIALES,  
CON FRECUENCIA DE CORTE DEFINIDA Y EN SU CASO, GRADO DE ATENUACION  
TAMBIEN DEFINIDO; RESULTADO IN PLACE

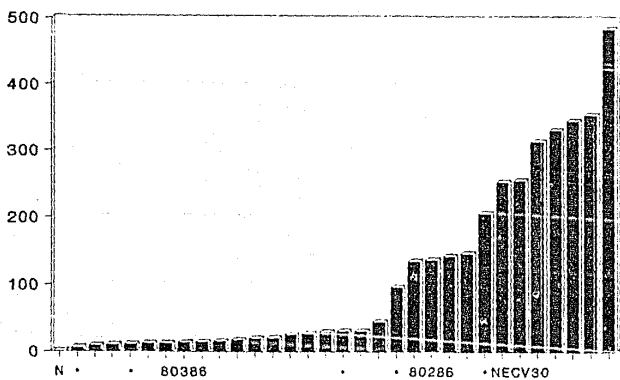


TRANSFORMADA BIDIMENSIONAL DE FOURIER  
INVERSA  
(PROCEDIMIENTO ANALOGO AL ESQUEMATIZADO EN  
LAS PAGINAS ANTERIORES)

SUBIMAGEN TRANSFORMADA

*FFT/IFFT*

*Unidimensional  
1024 datos reales*



## DESARROLLO DE LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER EN 1024 DATOS REALES

	COMPUTADORA	PROCESADOR	MEMORIA	TIEMPO	PROGRAMA
1	Next	66030/68862/DST56201	8 Mbyte DRAM	35.10 <sup>3</sup>	
2	BPM/XT	8086/8087 10MHz	640 Kbytes RAM	5	RUTINA TESIS
3	Acer 1100/33	80386 33MHz	4 Mbyte 32 bits DRAM	6	MathCAD v2.0
4	ALR MicroFlex 7000	80386 25MHz	2 Mbyte 32 bits DRAM	9	MathCAD v2.0
5	BPM/XT	8086/8087 4MHz	640 Kbytes RAM	10	RUTINA TESIS
6	ALP FlexCache 150	80386 20MHz	1 Mbyte 32 bits DRAM	11	MathCAD v2.0
7	Tandy 5000 MC	80386 20MHz	2 Mbyte 32 bits DRAM	12	MathCAD v2.0
8	EverestStep 386/20	80386 20MHz	2 Mbyte 32 bits DRAM	13	MathCAD v2.0
9	IBM PS 2 70-121	80386 20MHz	2 Mbyte 32 bits RAM	14	MathCAD v2.0
10	AST Premium 386	80386 20MHz	2 Mbyte DRAM	15	MathCAD v2.0
11	Toshiba T5100	80386 16MHz	2 Mbyte 32 bits DRAM	17	MathCAD v2.0
12	IBM PS 2 70-661	80386 16MHz	1 Mbyte RAM	19	MathCAD v2.0
13	Compaq 386s	80386SX 16MHz	1 Mbyte SRAM	20	MathCAD v2.0
14	Tatung TCS-8000	80386 20MHz	1 Mbyte 16 bits DRAM	25	MathCAD v2.0
15	Proteus 386A	80386 20MHz	4 Mbyte 32 bits DRAM	26	MathCAD v2.0
16	GFICase 1530	80386 16MHz	2 Mbyte 32 bits DRAM	27	MathCAD v2.0
17	BPM/AT	80286 16MHz	1 Mbyte RAM	30	RUTINA TESIS
18	IBM PS 2 502	80286 10MHz	1 Mbyte 16 bits RAM	30	MathCAD v2.0
19	AST Bravo 285	80286 8MHz	512 Kbytes DRAM	44	MathCAD v2.0
20	BPM/XT	8088 10MHz	640 Kbytes RAM	96	RUTINA TESIS
21	Denith Supersport	80286 12MHz	1 Mbyte RAM	134	MathCAD v2.0
22	Olivar 286	80286 12MHz	640 Kbytes RAM	136	MathCAD v2.0
23	Mitsubishi NP_286L	80286 12MHz	640 Kbytes RAM	142	MathCAD v2.0
24	Compaq SLT/286	80286 12MHz	640 Kbytes RAM	146	MathCAD v2.0
25	BPM/XT	8088 4MHz	640 Kbytes RAM	200	RUTINA TESIS
26	Epson Equity LT	NEC8030 10MHz	640 Kbytes DRAM	253	MathCAD v2.0
27	NEC Ultralite	NEC8030 12MHz	640 Kbytes DRAM	255	MathCAD v2.0
28	NEC MultiSpeed HD	NEC8030 10MHz	640 Kbytes RAM	314	MathCAD v2.0
29	Amstrad PPC640	8086 8MHz	640 Kbytes RAM	331	MathCAD v2.0
30	HP Vectra GS 20	NEC8030 8MHz	640 Kbytes RAM	345	MathCAD v2.0
31	Sharp PC-4641	NEC8030 10MHz	640 Kbytes RAM	354	MathCAD v2.0
32	GRiD 140 XT	NEC8028 8MHz	768 Kbytes RAM	465	MathCAD v2.0
	MODULO COMERCIAL	MICROPROCESADORES	MEMORIA DE	SEGUNDOS	BENCHMARK
		ARQUITECTURA SECUENCIAL	ACCESO ALTERNATIVO		RESULTA EN

Función : transformada de Fourier unidimensional con valores trigonométricos precálculados.  
 Prototipo : void fourier\_e (void)  
 Notas : transformación/antitransformación [E].

```

void fourier_e (void)
{
    register unsigned          i, j=1, l;
    unsigned                  le=1, le1, ip;
    double au, bu, at=0.0, bt=0.0, tr=0.0, ti=0.0;
    for( i=1; i<N; i++ )
    {
        if( i < j )
        {
            tr = (bvect+j)->x;
            ti = (bvect+j)->y;
            (bvect+j)->x = (bvect+i)->x;
            (bvect+j)->y = (bvect+i)->y;
            (bvect+i)->x = tr;
            (bvect+i)->y = ti;
        }
        k1 = M;
        while ( k1 < j )
        {
            j -= k1;
            k1 /= 2;
        }
        j += k1;
    }
    for( l=0; l<k; l++ )
    {
        le *= 2;
        le1 = le/2;
        au = 1.0;
        bu = 0.0;
        for( j=1; j<=le1; j++ )
        {
            for( i=j; i<=N; i+=le )
            {
                ip = i+le1;
                tr = (au*(bvect+ip)->x) - (bu*(bvect+ip)->y);
                ti = (au*(bvect+ip)->y) + (bu*(bvect+ip)->x);
                (bvect+ip)->x = (bvect+i)->x - tr;
                (bvect+ip)->y = (bvect+i)->y - ti;
                (bvect+i)->x += tr;
                (bvect+i)->y += ti;
            }
            at = (au*(btrig+l)->c) - (bu*(btrig+l)->s);
            bt = (au*(btrig+l)->s) + (bu*(btrig+l)->c);
            au = at;
            bu = bt;
        }
    }
}
    }
}

```

### [Definición de rutinas tipo E]

**Función** : define área de estructura tipo `cmplx` para manipulación de números complejos.  
**Prototipo** : `cmplx *bloque_e (unsigned)`  
**Notas** : definición dinámica a través del parámetro, estructura de precisión de punto flotante sencilla.

```
cmplx *bloque_e (d)
unsigned      d;
{
    return( (cmplx*) malloc(d*sizeof(cmplx)) );
}
```

**Función** : realiza escalamiento unidimensional del vector `bvect`.  
**Prototipo** : `void fescala_e (void)`  
**Notas** : toma como referencia `N` (número de datos a transformar).

```
void fescala_e (void)
{
    register unsigned i;
    float      n=N;
    bvect = bvecti+1;
    for( i=0; i<N; i+ )
    {
        (bvect+i)->x /= n;
        (bvect+i)->y /= n;
    }
}
```

**Función** : realiza la traslación de los valores a transformar, uso de la propiedad de traslación para ubicar el espectro de Fourier con la frecuencia fundamental al centro, necesario para la aplicación de filtros radialmente simétricos.

**Prototipo** : `void traslacion_e (void)`  
**Notas** : traslación unidimensional sobre el vector `bvect`.

```
void traslacion_e (void)
{
    register int i, t=1;
    bvect = bvecti+1;
    for( i=0; i<N; i+ )
    {
        (bvect+i)->x *= t;
        (bvect+i)->y *= t;
        t *= -1;
    }
}
```

[Definición de rutinas tipo E]

**Función** : transposición del área compleja btabl al bloque complejo bproc (bidimensional).  
**Prototipo** : void transp\_e (void)  
**Notas** : uso del área auxiliar.

```
void transp_e (void)
{
    register unsigned i, j, c=0;
    btabl = btabli;
    bproc = bproci;
    for( j=0; j<=N; j++ )
    {
        (bproc+c )->x = (btabl+(i*(N+1)+j))->x;
        (bproc+c++)->y = (btabl+(i*(N+1)+j))->y;
    }
}
```

**Función** : asignación de valores procesados (filtrados) del área compleja btabl al bloque 2.  
**Prototipo** : void recupera\_e (void)  
**Notas** : cálculo de la amplitud del espectro en lugar de asignar la parte real.

```
void recupera_e (void)
{
    register unsigned i, j=0;
    double espectro;
    btabl = btabli+1;
    for( i=0; i<(N*(N+1)); i++ )
    {
        espectro = sqrt( (btabl+i)->x * (btabl+i)->x ) +
                    (btabl+i)->y * (btabl+i)->y )
        if(j>N-1)
        {
            bimg2 = bimg2+pixels;
            j = 0;
        }
        else
        {
            (bimg2+j)->x = floor(espectro/N);
            ++j;
        }
    }
}
```

[Definición de rutinas tipo E]

**Función** : reserva área trigonométrica tipo `trigx` con `k` localidades.  
**Prototipo** : `trigx *bloque_t (void)`  
**Notas** : cada localidad tipo `trigx` ocupa 16 bytes.

```
trigx *bloque_t (void)
{
    return( (trigx*) malloc(k*sizeof(trigx)) );
}
```

**Función** : calcula la tabla trigonométrica con precisión de punto flotante doble, `k` valores calculados.  
**Prototipo** : `void tabtrig_e (void)`  
**Notas** : parte real:coseno, parte imaginaria:seno.

```
void tabtrig_e (void)
{
    register unsigned j;
    double a, i=1.0;
    for( j=0; j<k; j++ )
    {
        a = PI/i;
        (btrig[j])>c = cos(a);
        (btrig[j])>s = -sin(a);
        i *= 2.0;
    }
}
```

**Función** : calcula el complejo conjugado de la tabla trigonométrica.  
**Prototipo** : `void conjuga_e (void)`  
**Notas** : modifica la parte imaginaria de la tabla trigonométrica precalculada (seno).

```
void conjuga_e (void)
{
    register unsigned j;
    for( j=0; j<k; j++ )
        (btrig[j])>ss *= -1.0;
}
```



[Definición de rutinas tipo E]

Función : convolución en el dominio espectral de  
frecuencias con filtro pasa baja ideal.  
 Prototipo : void ideal\_baja (double)  
 Notas : frecuencia de corte semivariable, aplicación  
de filtro radialmente simétrico sobre el  
Área compleja btabl.

función de transferencia pág. 74 Capítulo III.

```
void ideal_baja (fdc)
double fdc;
{
    register unsigned i=0;
    register int u, v;
    int m=M;
    double temp;

    btabl = btabl+1;
    for( u = -m; u <= m; u++ )
    {
        for( v = -m; v <= m; v++ )
        {
            temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) (v*v) );
            if( temp <= fdc )
            {
                (btabl+i)->x *= (float) 1.0;
                (btabl+i)->y *= (float) 1.0;
            }
            else
            {
                (btabl+i)->x = (float) 0.0;
                (btabl+i)->y = (float) 0.0;
            }
            i++;
        }
    }
}
```

[Definición de rutinas tipo E]

**Función** : convolución en el dominio espectral de  
frecuencias con filtro pass baja parabólica.  
**Prototipo** : void parabólica\_baja (double, double, double)  
**Notas** : frecuencia de corte variable.  
coeficiente de atenuación variable (20).  
usa el criterio general de frecuencia.  
aplicación de filtros radialmente simétrico  
sobre el área completa btabl.

función de transferencia pag. 15, 89 Capítulo III.

```
void parabólica_baja (fdc, exp2n, sigma)
double fdc, exp2n, sigma;
{
    register unsigned i=0;
    register int u, v;
    int m=M;
    double temp, fdt, amplitud;

    amplitud = 1.0/sigma;
    fdc *= sigma;

    btabl = btabl+1;
    for( u = -m; u <= m; u++ )
    {
        for( v = -m; v <= m; v++ )
        {
            temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) ((v*v) ) );
            if( temp < fdc )
            {
                temp = CTE1*(temp/fdc);
                fdt = amplitud * (1.0-pow(temp,exp2n));
                (btabl+i)->x *= fdt;
                (btabl+i)->y *= fdt;
            }
            else
            {
                (btabl+i)->x = (float) 0.0;
                (btabl+i)->y = (float) 0.0;
            }
            i++;
        }
    }
}
```

[Definición de rutinas tipo E]

**Función** : convolución en el dominio espectral de  
frecuencias con filtro pasa baja butterworth  
**Prototipo** : void butterworth\_baja (double, double, double)  
**Notas** : frecuencia de corte variable,  
coeficiente de atenuación variable (20),  
usa el criterio porcentaie dispersion,  
aplicación de filtro radialmente simétrico  
sobre el área sombreada btabl.

función de transferencia pag. 26, 98 Capítulo III.

```
void butterworth_baja (fdc, exp2n, sigma)
double fdc, exp2n, sigma;
{
    register unsigned i=0;
    register int u, v;
    int m=M;
    double temp, fdt, amplitud;

    amplitud = 1.0/sigma;
    fdc *= sigma;

    btabl = btabli+1;
    for( u = -m; u <= m; u++ )
    {
        for( v = -m; v <= m; v++ )
        {
            temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) (v*v) );
            temp = CTE1*pow( (temp/fdc), exp2n );
            fdt = amplitud * (1.0/(temp+1.0));
            (btabl+i)->x *= fdt;
            (btabl+i)->y *= fdt;
            i++;
        }
    }
}
```

[Definición de rutinas tipo E]

**Función** : convolución en el dominio espectral de  
frecuencias con filtro pasa baja exponencial  
**Prototipo** : void exponencial\_baja (double,double,double)  
**Notas** : frecuencia de corte variable,  
coeficiente de atenuación variable (2D),  
usa el criterio porcentual de dispersión,  
aplicación de filtro radialmente simétrico  
sobre el área compleja btabl.

función de transferencia pág. 77. Bê Capítulo III.

```
void exponencial_baja (fdc, exp2n, sigma)
double
    fdc, exp2n, sigma;
{
    register unsigned    i=0;
    register int         u, v;
    int                  m=M;
    double temp, fdt, amplitud;

    amplitud = 1.0/sigma;
    fdc *= sigma;

    btabl = btabli+1;
    for( u = -m; u <= m; u++ )
    {
        for( v = -m; v <= m; v++ )
        {
            temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) (v*v) );
            temp = CTE2*pow( (temp/fdc), exp2n );
            fdt = amplitud * exp(temp);
            (btabl+i)->x *= fdt;
            (btabl+i)->y *= fdt;
            i++;
        }
    }
}
```

[Definición de rutinas tipo E]

Función : convolución en el dominio espectral de  
frecuencias con filtro pasa baja gaussiano.  
 Prototipo : void gaussiano\_baja (double,double,double)  
 Notas : frecuencia de corte variable,  
coeficiente de atenuación variable (20),  
usa el criterio porcentual de dispersión,  
aplicación de filtro radialmente simétrico  
sobre el área compleja btabl.

función de transferencia pág. 78, 89 Capítulo III.

```
void gaussiano_baja (fdc, exp2n, sigma)
double                fdc, exp2n, sigma;
{
    register unsigned   i=0;
    register int        u, v;
    int                 m=M;
    double temp, fdt, cte=0.0, amplitud;

    amplitud = 1.0/sigma;
    fdc *= sigma;
    cte = CTE2*PI;

    btabl = btabli+1;
    for( u = -m; u <= m; u++ )
    {
        for( v = -m; v <= m; v++ )
        {
            temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) (v*v) );
            temp = temp/fdc;
            temp = cte*pow(temp,exp2n);
            fdt = amplitud * exp(temp);
            (btabl+i)->x *= fdt;
            (btabl+i)->y *= fdt;
            i++;
        }
    }
}
```

[Definición de rutinas tipo E]

Función : convolución en el dominio espectral de  
frecuencias con filtro pasa baja trapezoidal  
Prototipo : void trapezoidal\_baja (double, double)  
Notas : frecuencias de corte variables,  
aplicación de filtro radialmente simétrico  
sobre el área compleja btabl.

función de transferencia pág. 79 Capítulo III.

```
void trapezoidal_baja (fdc1, fdc2)
double fdc1, fdc2;
{
    register unsigned i=0;
    register int u, v;
    int m=M;
    double temp, fdt;

    btabl = btabl+i;
    for( u = -m; u <= m; u++ )
    {
        for( v = -m; v <= m; v++ )
        {
            temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) (v*v) );
            if( temp < fdc0 )
            {
                (btabl+i)->x *= (float) 1.0;
                (btabl+i)->y *= (float) 1.0;
            }
            else
            if( (fdc0<=temp) && (temp<=fdc1) )
            {
                fdt = (double) (temp-fdc1)/(fdc0-fdc1);
                (btabl+i)->x *= fdt;
                (btabl+i)->y *= fdt;
            }
            else
            if( temp > fdc1 )
            {
                (btabl+i)->x = (float) 0.0;
                (btabl+i)->y = (float) 0.0;
            }
            i++;
        }
    }
}
```

[Definición de rutinas tipo E]

**Función** : convolución en el dominio espacial de  
 imágenes con filtro para baja frecuencia.  
**Prototipo** : void rampa\_baja (double)  
**Notas** : frecuencia de corte variable,  
 aplicación de filtro radialmente simétrico  
 sobre el área completa btabi.

función de transferencia pag. 79 Capítulo III.

```

void rampa_baja (fdc)
double fdc;
{
    register unsigned i=0;
    register int u, v;
    int m=M;
    double temp, fdt;

    btabi = btabi+1;
    for( u = -m; u <= m; u++ )
    {
        for( v = -m; v <= m; v++ )
        {
            temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) (v*v) );
            if( temp <= fdc )
            {
                fdt = (double) (fdc-temp)/fdc;
                (btabi+i)->x *= fdt;
                (btabi+i)->y *= fdt;
            }
            else
            {
                (btabi+i)->x = (float) 0.0;
                (btabi+i)->y = (float) 0.0;
            }
            i++;
        }
    }
}
    
```

[Definición de rutinas tipo E]

**Función** : convolución en el dominio espectral de  
frecuencias con filtro paso alta ideal.  
**Prototipo** : void ideal\_alta (double)  
**Notas** : frecuencia de corte semivariable, aplicación  
de filtro radialmente simétrico sobre el  
área completa btabl.

funcion de transaccion pag. 83 Capitulo III.

```
void ideal_alta (fdc)
double fdc;
{
    register unsigned i=0;
    register int u, v;
    int m=M;
    double temp;

    btabl = btabl+i;
    for( u = -m; u <= m; u++ )
    {
        for( v = -m; v <= m; v++ )
        {
            temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) (v*v) );
            if( temp <= fdc )
            {
                (btabl+i)->x = (float) 0.0;
                (btabl+i)->y = (float) 0.0;
            }
            else
            {
                (btabl+i)->x *= (float) 1.0;
                (btabl+i)->y *= (float) 1.0;
            }
        }
    }
}
```



[Definición de rutinas tipo E]

**Función** : convolución en el dominio espectral de  
frecuencias con filtro pasa alta parabólico.  
**Prototipo** : void parabólica\_alta (double, double, double)  
**Notas** : frecuencia de corte variable,  
 coeficiente de atenuación variable (20),  
 usa el criterio porcentual de dispersión,  
 aplicación de filtro radialmente simétrico  
 sobre el área compleja btabl.

función de transferencia pág. 82, 89 **Capítulo III.**

```
void parabólica_alta (fdc, exp2n, sigma)
double                fdc, exp2n, sigma;
{
    register unsigned   i=0;
    register int        u, v;
    int                 m=M;
    double              temp, fdt, amplitud;

    amplitud = 1.0 - (1.0/sigma);
    fdc *= sigma;

    btabl = btabli+1;
    for( u = -m; u <= m; u++ )
    {
        for( v = -m; v <= m; v++ )
        {
            temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) (v*v) );
            if( temp <= fdc )
            {
                temp = CTE1 * (temp/fdc);
                fdt = amplitud * pow(temp, exp2n);
                (btabli+i)->x *= fdt;
                (btabli+i)->y *= -fdt;
            }
            else
            {
                (btabli+i)->x *= (float) 1.0;
                (btabli+i)->y *= (float) 1.0;
            }
        }
    }
}
```

[Definición de rutinas tipo F:]

**Función** : Convulsión de un sistema conmutado de  
función de transferencia con filtro paso alto Butterworth  
**Prototipo** : void butterworth\_ahf (fdc, exp2n, sigma)  
**Notas** : fraccion de corte variable  
coeficiente de atenuación variable (dB)  
usa el sistema normalizado directamente  
aplicación de filtro (altamente simétrico)  
ver el programa btahf.

función de transferencia pag. 81. 83 Capitulo III.

```
void butterworth_ahf (fdc, exp2n, sigma)
double fdc, exp2n, sigma;
{
    register unsigned i 0;
    register int u, v;
    int m;
    double temp, fdt, amplitud;

    amplitud = 1.0 (1.0/sigma);
    fdc *= sigma;

    btahf = btahf;
    for( u = 1; u <= m; u++ )
    {
        for( v = m; v >= m; v-- )
        {
            temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) (v*v) );
            fdt = CTE1 * pow((fdc/(temp*0.000009)),exp2n);
            (btahf[i]-bx) *= fdt;
            (btahf[i]-by) *= fdt;
            i++;
        }
    }
}
```

[Definición de rutinas tipo E]

**Función** : convolución en el dominio espectral de  
frecuencias con filtro pasa alta exponencial  
**Prototipo** : void exponencial\_alta (double,double,double)  
**Notas** : frecuencia de corte variable,  
coeficiente de atenuación variable ( $2^n$ ),  
usa el criterio porcentual de dispersión,  
aplicación de filtro radialmente simétrico  
sobre el área compleja btabl.

función de transferencia pág. 22, 28 Capítulo III.

```
void exponencial_alta (fdc, exp2n, sigma)
double                fdc, exp2n, sigma;
{
    register unsigned  i=0;
    register int       u, v;
    int                m=M;
    double temp, fdt, amplitud;

    amplitud = 1.0 - (1.0/sigma);
    fdc *= sigma;

    btabl = btabl+i+1;
    for( u = -m; u <= m; u++ )
    {
        for( v = -m; v <= m; v++ )
        {
            temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) (v*v) );
            temp = CTE2 * pow((fdc/(temp+0.000009)),exp2n);
            fdt = amplitud + exp(temp);
            (btabl+i)->x *= fdt;
            (btabl+i)->y *= fdt;
            i++;
        }
    }
}
```

[Definición de rutinas tipo E]

**Función** : convolución en el dominio espectral de frecuencias con filtro pasa alta trapezoidal  
**Prototipo** : void trapezoidal\_alta (double, double)  
**Notas** : frecuencias de corte variables, aplicación de filtro radialmente simétrico sobre el área compleja btabl.

función de transferencia pág. 60 Capítulo III.

```

void trapezoidal_alta (fde1, fdc2)
double fdc1, fdc2;
{
    register unsigned i=0;
    register int u, v;
    int m=M;
    double temp, fdt;

    btabl = btabli+1;
    for( u = -m; u <= m; u++ )
        for( v = -m; v <= m; v++ )
            temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) (v*v) );
            if( temp > fdc0 )
                (btabl+i)*x = (float) 1.0;
                (btabl+i)*y = (float) 1.0;
            else
                if( (fdc1-temp) >= (temp-fdc0) )
                    fdt = (double) (temp fdc1)/(fdc0-fdc1);
                    (btabl+i)*x = fdt;
                    (btabl+i)*y = fdt;
                else
                    if( temp < fdc1 )
                        (btabl+i)*x = (float) 0.0;
                        (btabl+i)*y = (float) 0.0;
                    }
            i++;
        }
}

```

[Definición de rutinas tipo E]

**Función** : convolución en el dominio espacial de  
frecuencias con filtro B&B5 alta rampa  
**Prototipo** : void rampa\_alta (double)  
**Notas** : frecuencia de corte semivariable,  
aplicación de filtro radialmente simétrico  
sobre el área completa btabl.

función de transferencia pág. 85, 90 Capítulo III.

```
void rampa_alta (fdc)
double fdc;
{
  register unsigned i=0;
  register int u, v;
  int m=M;
  double temp, fdt;

  btabl = btabli+1;
  for( u = -m; u <= m; u++ )
  {
    for( v = -m; v <= m; v++ )
    {
      temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) (v*v) );
      if( temp >= fdc )
      {
        fdt = (double) 1 - (temp/fdc);
        (btabl+i)*x *= fdt;
        (btabl+i)*y *= fdt;
      }
      else
      {
        (btabl+i)*x *= (float) 1.0;
        (btabl+i)*y *= (float) 1.0;
      }
    }
  }
}
```

[Definición de rutinas tipo E]

**Función** : convolución en el dominio espectral de  
frecuencias con filtro pasa banda gaussiano.

**Prototipo** :  
`void pbgaussiano (double,double,double,double,double,double)`

**Notas** : frecuencias de corte variables.  
aplicación de filtro radialmente simétrico  
sin atenuación, sobre el área compleja  
btabl.

función de transferencia pág. 91 Capítulo III.

```
void pbgaussiano(fdc,exp2n,sigma,tau,amp1,amp2)
double          fdc,exp2n,sigma,tau,amp1,amp2;
{
    register unsigned          i;
    double fdt, temp1=0.0, temp2=0.0,
           t1=0.0, t2=0.0, cte=0.0;
    int    s, v, u, m=M;

    temp1=fdc*sigma;
    temp2=fdc*tau;
    cte=PI*CTE2;

    btabl = btabli+1;
    for( u = -m; u <= m; u++ )
    {
        for( v = -m; v <= m; v++ )
        {
            s = (u*u) + (v*v);
            t1 = temporal*pow((s/temp1),exp2n);
            t2 = temporal*pow((s/temp2),exp2n);
            fdt = (amp1*exp(t1)) - (amp2*exp(t2));
            (btabl+i)->x *= fdt;
            (btabl+i)->y *= fdt;
            i++;
        }
    }
}
```

[Definición de rutinas tipo E]

Función : convolución en el dominio espectral de  
frecuencias con filtro pasa banda.  
Prototipo : void pasa\_banda (double,double)  
Notas : frecuencias de corte variables.  
aplicación de filtro radialmente simétrico  
sin atenuación, sobre el área compleja  
btabl.

```
void pasa_banda (fdc1, fdc2)
double          fdc1, fdc2;
{
    register unsigned i=0;
    register int      u, v;
    int              m=N;
    double           temp;

    btabl = btabl+i;
    for( u = -m; u <= m; u++ )
    {
        for( v = -m; v <= m; v++ )
        {
            temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) (v*v) );
            if( (temp >= fdc1) && (temp <= fdc2) )
            {
                (btabl+i)->x *= (float) 1.0;
                (btabl+i)->y *= (float) 1.0;
            }
            else
            {
                (btabl+i)->x = (float) 0.0;
                (btabl+i)->y = (float) 0.0;
            }
            i++;
        }
    }
}
```

[Definición de rutinas tipo E]

Función : convolución en el dominio espectral de  
frecuencias con filtro elimina banda.  
 Prototipo : void elimina\_banda (double,double,double,double)  
 Notas : frecuencias de corte variables,  
aplicación de filtro radialmente simétrico  
sin atenuación, sobre el área compleja  
btabl.

```
void elimina_banda (fdc1, fdc2, fdc3, fdc4)
double fdc1, fdc2, fdc3, fdc4;
{
    register unsigned i=0;
    register int u, v;
    int m=M;
    double temp;

    btabl = btabli+i;
    for( u = -m; u <= m; u++ )
    {
        for( v = -m; v <= m; v++ )
        {
            temp = sqrt( (float) (u*u) + (float) (v*v) );
            if( ((fdc1 <= temp) && (temp <= fdc2)) ||
                ((fdc3 < temp) && (temp <= fdc4)) )
            {
                (btabl+i)->x *= (float) 1.0;
                (btabl+i)->y *= (float) 1.0;
            }
            else
            {
                (btabl+i)->x = (float) 0.0;
                (btabl+i)->y = (float) 0.0;
            }
        }
        i++;
    }
}
```



**IMP-DIP-08124 TARJETA DIGITALIZADORA DE VIDEO  
MONOCROMÁTICO PARA PC**

**Características**

- . Digitalizadora de video en tiempo real de bajo costo con resolución de 256x238 pixels por línea, compatible a bus de IBM PC/XT.
- . Acepta formato de entrada NISC de cámara de video estándar o cámara de estado sólido CCD.
- . Digitaliza un cuadro cada treinta segundos, con una precisión de 6 bits por pixel de niveles de cuantificación.
- . Almacenamiento en la tarjeta mapeable a RAM de la PC.

**Descripción**

La IMP-DIP es una tarjeta digitalizadora de video monocromático de bajo costo, con resolución espacial de 256x238 pixels por línea, para adquisición de datos en tiempo real, conectable a cualquier ranura de expansión IBM PC, PC/XT. Esta tarjeta periférica digitaliza una entrada de video compuesto en el estándar NISC proveniente de una cámara de video o una cámara de estado sólido CCD y emite una salida de video compuesto de imágenes monocromáticas a 64 niveles de gris. La arquitectura de la IMP-DIP se caracteriza por su almacenamiento por cuadro de alta velocidad, controlada por el microprocesador anfitrión.

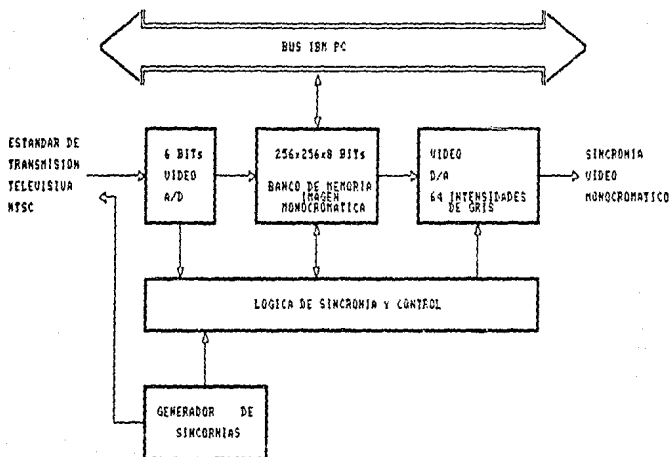
**Entrada de Video**

La IMP-DIP digitaliza y despliega un cuadro entero de 256x238 en un 1/30 de segundo. La señal de entrada de video es digitalizada por un convertidor analógico digital tipo flash operando a una frecuencia de 10MHz con una precisión de valores discretos de 6 bits por pixel. Cada valor discreto representa uno de los 64 niveles de cuantificación posibles en la escala de gris.

**Sincronización de Video**

Un grupo de componentes de la tarjeta IMP-DIP generan las sincronías horizontal y vertical la cual sincronizan la señal de entrada de video compuesto, diseñado para aceptar entrada de video NISC de una variedad de fuentes incluyendo cámaras de video estándar y cámaras de estado sólido CCD sin sacrificar ancho de banda. La figura B.1 ilustra la disposición de los componentes de sincronía y control.

## INTERFACE DIGITALIZADORA



DESCRIPCION FUNCIONAL DE LA TARJETA DIGITALIZADORA DE VIDEO  
CON ESTANDAR DE TRANSMISION TELEVISIVA NTSC (IMP-231).

FIGURA B.1

### Sincronización de Video

Las señales NISC y RS-170 producen un cuadro televisivo que contiene dos campos de líneas horizontales, un campo par que comprende todas las líneas horizontales pares y un campo impar donde se encuentran las líneas horizontales impares. Los pulsos de sincronía horizontal inician en cada línea, mientras que los pulsos de sincronía vertical, sincronizan cada campo. El despliegado alternativo de los campos par e impar a una frecuencia de 60 campos por segundo conforma un cuadro completo, entrelazando una imagen a una frecuencia de 30 cuadros por segundo.

La circuitería de captación, provee las señales de tiempo que dividen cada línea horizontal en un conjunto discreto de pixels. Los pixels forman una trama bidimensional en el dispositivo de despliegado, típicamente entre 256 y 512 unidades tanto en amplitud como en altitud. La forma de los pixels, y en consecuencia la forma de la imagen entera, puede ser cuadrada o rectangular. La razón de las dimensiones horizontal y vertical se denominan razón de aspecto. Las imágenes televisivas del estándar RS-170 tienen una razón de aspecto de 4:3; es decir, su amplitud es 1.3 veces su altitud.

### Banco de Memoria por Cuadro

El banco de memoria de la tarjeta IMP-DIP es de 256x256x8 bits en memoria estática, transferible por software a cualquier área de RAM de 64 Kbytes de la PC. El banco de memoria almacena un cuadro completo para proceso y despliegue concurrente. Cuando la tarjeta está activamente adquiriendo cuadros, el pulso de sincronía vertical da la señal para que un nuevo cuadro sea escrito en el banco de memoria. Cada cuadro sucesivo se escribe sobre el cuadro precedente a una frecuencia de 30 cuadros por segundo, una vez en el banco de memoria, el cuadro puede ser despliegado, transferido y procesado en el sistema de la PC o enviado a disco.

### Emisión de Video

La IMP-DIP emite imágenes monocromáticas con precisión de 6 bits por pixel que implican 64 niveles de cuantificación convertidos analógicamente por un convertidor digital analógico operando a una frecuencia de 5MHz al estándar de video NISC hacia un monitor analógico.

## ESPECIFICACIONES IMP DIP-D6124

### Recepción Monocromática de Video

Señal de entrada	@ 60Hz NTSC, CA acoplada
A/D precisión	6-bits a 10MHz
Velocidad de adquisición	1/30 de segundo
Señal de sincronía	compuesta horizontal y vertical generada de forma interna
Resolución espacial	@ 60Hz, 240x256 líneas/pixel

### Emisión de Video Monocromático

Señal de salida	@ 60Hz NTSC
D/A	64 niveles de cuantificación
Señal de sincronía	compuesta horizontal y vertical
Aspecto del pixel (razón)	4 : 3

### Banco de Memoria

Banco de memoria de la tarjeta	256x256x8 bits, 64 Kbytes en memoria estática
Acceso	indirecto a través de programa (no compatible con bus FC)

### Especificaciones Ambientales

Temperatura de operación	0 a 50 °C
Temperatura de manipulación	-25 a 70 °C
Humedad relativa	0 al 95% sin condensación

### Especificaciones Eléctricas

Requerimientos de potencia	+ 5 V, $\pm$ 5% @ 2.0 A típico $\pm$ 12 V, $\pm$ 5% @ 250mA típico
----------------------------	---

### Especificaciones de Cable y Conector

Conector PC P1	conector al bus 62 pines I/O
Conectores I/O	DIN video y sincronías
Cables I/O	RG58/U 75 ohm coaxial
Conectores de salida	RCA
Conectores al monitor	BNC hembra.

Cámara de circuito cerrado ITC-56 Ikegami (CCIV Camera), es el dispositivo de captación visual. Sus características tecnológicas son las siguientes:

#### **Emisión de Video Monocromático**

Tecnología 1" enfoque magnético, deflexión magnética  
 malla integral de vidicon 7252A

Frecuencia horizontal 15.75 KHz, vertical 60 Hz

Señal de salida de video 1.0 V (p-p) video compuesto

Resolución horizontal 700 líneas

Relación Señal/Ruido 45 dB

Sensitividad iluminación caratula 0.05 candelas mínimo,  
 iluminación de escena con lentes F:1.4 y  
 89% de reflectancia del objeto 0.6  
 candelas mínimo.

#### **Especificaciones Eléctricas**

Potencia requerida 100-120 V CA, 60 Hz

Potencia consumida 18 watts

#### **Sistema Optico**

Tipo de lentes estándar cinema tipo C

#### **Especificaciones de Cable y Conector**

Conector de Video (salida) UHF cabeza robusta (hembra)  
 conector coaxial

Conector de Pulso (entrada) 5-pin tipo DIN

Convertidor Analógico Digital CMOS a velocidad de video de 6 bits de precisión tipo flash RCA CA3300 circuito lineal integrado. El RCA CA3300 es un convertidor CMOS paralelo tipo flash de 50-mW de potencia, diseñado para aplicaciones que demandan tanto bajo consumo de potencia como alta velocidad de digitalización.

Los convertidores tipo flash emplean (2<sup>n</sup>)-1 comparadores para desarrollar conversiones de n bits (la complejidad del convertidor se incrementa exponencialmente con el incremento lineal en su resolución).

## Características del Convertidor Analógico Digital

CMOS baja potencia, alta velocidad,  
Técnica de conversión paralela,  
Tasa de muestreo 15Mhz (tiempo de conversión 66 ns),  
6 bits de precisión con bit de sobreflujo,  
 $\pm \frac{1}{2}$  de error en el bit menos significativo.  
Suministro de voltaje sencillo (3 a 10 V),  
2 unidades en serie permiten una precisión de 7 bits,  
2 unidades en paralelo permiten una frecuencia de  
muestreo de 30Mhz lo que implica un tiempo de  
conversión de 33 ns.

## Conversión Analógico Digital, Operación

Para una cámara que utiliza tecnología vidicon es necesario convertir la señal analógica para cada pixel en forma digital. El proceso de conversión analógico digital (A/D) implica tomar una señal de voltaje analógica y producir una salida que representa la señal de voltaje en la memoria digital de la computadora. La conversión (A/D) consiste en tres fases: Muestreo, Cuantificación y Encodificación.

### Muestreo

Una señal analógica dada es muestreada periódicamente para obtener una serie de señales analógicas discretizadas en el tiempo, este proceso es ilustrado en la figura B.2

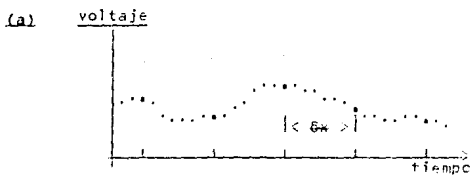


figura B.2 Muestreo y digitalización de una señal analógica

(a) señal analógica indicando el intervalo de muestreo,  $t_s$  y puntos de voltaje muestreados.

Muestreo

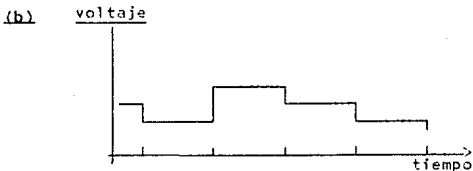


figura B.2 (b) aproximación digital de la señal analógica.

Estableciendo una tasa específica de muestreo, la señal analógica puede ser aproximada a valores digitales. La bondad de la aproximación citada, está determinada por la tasa de muestreo del convertidor A/D. La tasa de muestreo debe de ser al menos el doble de la más alta frecuencia en la señal de video (teorema de Nyquist), si se desea aproximar apropiadamente la señal original.

Cuantificación

Cada voltaje discretizado en el tiempo, es asignado a un número finito de niveles de amplitud definida. Estos niveles de amplitud corresponden a la escala de gris usada en el sistema. Los niveles de las amplitudes predefinidas son característicos del convertidor analógico digital en particular y consisten de un conjunto de valores discretos de niveles de voltaje. El número de niveles de cuantificación está definido por

$$\text{número de niveles de cuantificación} = 2^m$$

donde  $m$  es el número de bits del convertidor A/D. Un gran número de bits permite que la señal sea representada más precisamente, sin embargo a mayor número de bits, la complejidad del convertidor A/D se incrementa.

## Encodificación

Los niveles de amplitud que son cuantificados deben de ser transferidos a código digital. Este proceso llamado encodificación, implica representar un nivel de amplitud por una secuencia de dígitos binarios. La habilidad del proceso de encodificación para distinguir entre varios niveles de amplitud está en función del espaciamento de cada nivel de cuantificación. Dado un rango de escala total de una señal de video analógica, el espaciamento de cada nivel está definido por

$$\text{espaciamento de cuantificación} = \frac{\text{rango escala}}{2^n}$$

El error de cuantificación resultante del proceso de cuantificación puede ser definido como

$$\text{error de cuantificación} = \pm \frac{1}{2} \text{ espaciamento de cuantificación}$$

Así, para el convertidor RCA CA33000 de 6 bits de precisión y rango de escala total de 8V, se tiene

$$\text{niveles de cuantificación} = 2^6 = 64 \text{ niveles de gris}$$

$$\text{resolución} = 1/64 = 0.015625 \text{ o } 1.5625 \%$$

$$\text{espaciamento de cuantificación} = 8V/2^6 = 0.125V$$

$$\text{error de cuantificación} = \pm \frac{1}{2} (0.125) = 0.0625V$$

Para representar la señal de voltaje en forma binaria se involucra el proceso de encodificación. Este es llevado a cabo asignando la secuencia de dígitos binarios para representar los niveles de cuantificación que se incrementan uniformemente. Así para el convertidor A/D descrito anteriormente, se tiene:

Rango de Voltaje [0 a 8V]	Número Binario 6 bits	Hex	Escala de Gris
[ 0 , 0.125 )	0000 0000	00	0 (negro)
[ 0.125 , 0.25 )	0000 0001	01	1 (gris oscuro)
[ 0.25 , 0.375 )	0000 0010	02	2
.	.	.	.
.	.	.	.
[ 7.75 , 7.875 )	0011 1110	3E	E2 (gris claro)
[ 7.875 , 8.0 ]	0011 1111	3F	60 (blanco)



APLICACIONES DEL PROCESO DIGITAL DE IMAGENES

Reseña.

Basados en la premisa de que el Proceso de Imágenes era complejo y requería de computadoras poderosas para facilitar su complejidad, las primeras aplicaciones comerciales iniciaron en la década de los setenta, involucrando el uso de costoso equipo especializado. El mejor ejemplo de esta mentalidad es la visión mecánica en aplicaciones industriales, en la cual docenas de industrias tomaron parte invirtiendo capital público y privado, los objetivos eran los de automatizar las fábricas, particularmente industrias pesadas como las de los automóviles, con sistemas de visión para inspección, guía robótica y proceso de control. Estas compañías sostuvieron sus empresas con los razonables argumentos de que era una inversión rentable, ya que incrementaría la productividad y perfeccionaría la calidad. Con equipo con costo de decenas a cientos de miles de dólares, adicionado a los programas y a los costos en ingeniería mecánica, estos sistemas fueron un riesgo y llegaron a ser impopulares cuando no trabajaron bien o no trabajaron todo el tiempo o de hecho no trabajaron.

Los capitalistas aventureros retiraron su entusiasmo y su dinero. Los grandes impulsores de visión mecánica como General Motors dominaron su entusiasmo y se retractaron. Las compañías de visión cuya infraestructura era débil se fueron a la bancarrota y la industria de visión mecánica en su totalidad había sido enviada a reconsiderar sus expectativas.

Con la creación de las computadoras personales, sin embargo, un nuevo bus de datos emergió y el mundo real se abrió para varias aplicaciones, incluyendo el proceso de imágenes. Desde el inicio, las tarjetas de expansión sirvieron para reducir las limitaciones de los equipos, otras operaron a pesar de esas limitaciones. Tarjetas para ampliación de memoria, para comunicaciones, tarjetas multifunción, tarjetas graficadoras, tarjetas para adquisición de datos, tarjetas coprocesadoras, todas proliferaron. Entonces las aplicaciones utilizando la computadora personal proliferaron también y una de ellas fue el Proceso Digital de Imágenes; para ello, una tarjeta llamada frame grabber (tarjeta digitalizadora de video) emergió; primeramente incorporando sólo capacidades de captura y despliegue de imágenes y posteriormente capacidades de los subsistemas predecesores, las tarjetas digitalizadoras para equipo personal fueron bajas en costo y fáciles de usar. Repentinamente nuevas posibilidades surgieron y la popularidad del Proceso de Imágenes resurgió.

Actualmente las tarjetas digitalizadoras están disponibles y son distribuidas en una gran variedad de marcas. Estas son simples tarjetas conectables para computadoras que digitalizan una imagen de una señal de video, la almacenan en la memoria de la misma y la despliegan en tiempo real. Principalmente por que estas tarjetas son accesibles, ellas han originado un creciente interés en proceso y análisis visual. El rango de precios va desde menos de mil a cinco mil dólares, las tarjetas compatibles para equipos personales están siendo aplicadas en todas las áreas tradicionales de sistemas de visión artificial. En adición a su bajo costo se han abierto las posibilidades de investigación a nuevas aplicaciones tecnológicas.

A continuación se exponen tres casos típicos de aplicaciones de Proceso Digital de Imágenes, cada uno de ellos describe brevemente las adaptaciones necesarias con respecto al ambiente visual, al sistema de captación, a los problemas relativos con la información visual y algunas de la técnicas empleadas para solucionarlos.

#### **Caso 1**

#### **Titanic, Exploración del Fondo Marino por medio de vehículos remotamente operados provistos de equipo para Proceso Digital de Imágenes**

##### **Introducción**

Las expediciones francesa y norteamericana rastrearán el fondo del océano Atlántico con el fin de hallar la histórica embarcación que naufragó el 14 de Abril de 1912. Se utilizaron para la exploración, equipos de captación basados en principios acústicos y visuales, fue finalmente la expedición norteamericana que abordo del US Navy EUGENE y con el equipo acústico ANGUS, descubrió el transatlántico, las condiciones del ambiente requieren el uso de tecnología avanzada ya que el Titanic se halla a 595 Kms. al sur de Newfoundland a aproximadamente 4 kms. de profundidad, en aguas gelidas [21].

Una breve descripción del equipo utilizado, los problemas relacionados con la captación de información y los procesos empleados en la depuración de la misma, definirán el concepto de esta tecnología:

##### **Descripción General del Equipo**

ARAO equipo fotografico con formato de 35 mm y capacidad de 3000 tomas.

ANGUS Acoustically Navigated Geological Underwater Survey

Descripción General del Equipo (Caso 1)

precisión,  
 256 niveles en la escala de gris  
 resolución espacial,  
 480x512 líneas/píxel en modo continuo y  
 240x512 líneas/píxel por cuadro  
 equipado con hardware especializado para  
 captar, transmitir y procesar información visual  
 en tiempo real.

SAR Advanced Remote Acoustic SystemProblemas

iluminación escasa,  
 disipación de partículas,  
 transmisión ruidosa,  
 atenuación de la información.

Soluciones con respecto a la Información

Se utilizó equipo de captación remota que transmite analógicamente la señal de vídeo para su digitalización y proceso en sistemas remotos, las rutinas comúnmente empleadas fueron: filtros digitales por convolución espacial, análisis estadístico (histograma, linealización por histograma, expansión por histograma, etcétera), para realce de contraste, resaltamiento de contornos y proyecciones geométricas. □

Caso 2

Arte, Conservación, Restauración y Catálogo: el uso de tecnología de Proceso Digital de Imágenes en campos relacionados

Introducción

Los desarrollos técnicos de las últimas décadas han implicado una secuencia de revoluciones en lo que a conservación de arte y disciplinas relacionadas se refiere, como Arqueología, Historia Artística, Antropología e Industria Filmica. La información y la comprensión de estos campos se ha enriquecido conforme metodologías científicas y técnicas han sido introducidas. El realce de imágenes por medios digitales ha provado ser altamente útil en numerosos campos, la conservación de arte se ha beneficiado con la explotación de estas metodologías [2], [4], [38].

Descripción General del Equipo (Caso 2)

patrocinio:  
Jet Propulsion Laboratory NASA

precisión,  
6,291,456 colores  
resolución espacial,  
2600x2200 líneas/píxel

patrocinio:  
IBM Palo Alto Cal. Scientific Center

IBM 2250 MLIPS High Level Image Processing System  
IBM 5080 Workstation  
IBM 2081 Computer

compañías especializadas en pseudocolorización:

Coloration Inc. of Toronto  
Color Systems Technology of Hollywood

### Problemas

decoloramiento,  
restauración errónea,  
amarillamiento del barniz,  
agrietamiento,  
brillo,  
deterioro,  
descubrir arrepentimientos.

### Soluciones con respecto a la Información

Proceso en el dominio espectral Fourier explotando la naturaleza periódica de las grietas, linealización por histograma, manipulación selectiva, proceso estadístico, pseudocolorización, uso de tablas de referencia, etcétera.

]

### Caso 3

Robótica. Guía Mecánica: la aplicación del Proceso Digital de Imágenes en Tiempo Real

### Introducción

Proyecto CVDH. Cálculo Visual de Distancias y Movimiento como parte de ESPRII, proyecto europeo de investigación y desarrollo de tecnología informática en equipos y programas.

Equipo estereoscópico auxiliado por CAPTAN, Calculador Paralelo para Imágenes, Tratamiento de Señales y Análisis Numérico, sobre un robot móvil construido en el INRIA, Instituto Nacional de Investigación de Informática y Automática [44].

Descripción General del Equipo

- precisión,
- 256 niveles de gris.
- resolución espacial,
- 512x512 líneas/pixel.
- computadora de arquitectura paralela de uso específico.

Problemas

Detección de contornos para reconstruir la información necesaria para el movimiento del robot (medida de las distancias, detección de obstáculos, etcétera) a partir de siluetas.

Soluciones con respecto a la Información

Proceso de la información de forma secuencial y encadenada tipo pila. Uso de arquitectura paralela en el proceso de información visual, abarcando las siguientes etapas:

- captación,
- detección de puntos del contorno,
- encadenamiento de puntos del contorno y
- aproximación poligonal de las cadenas de puntos.



## TENDENCIA EN INVESTIGACION Y DESARROLLO

Actualmente el Proceso Digital de Imágenes ha evolucionado conceptualmente en lo que a teoría y aplicación práctica concierne, con especial interés en el desarrollo comercial de equipos en los que la parte principal es el género humano corren paralelamente a la idea central de la llamada Quinta Generación de Computadoras [10], [16], [44], [91].

### Tendencia MIT

El Media Laboratory del Massachusetts Institute of Technology MIT es ejemplo representativo de ésta evolución y donde se aspira a eliminar el avance aislado de los medios de comunicación y compilarlos en la más avanzada investigación en tecnologías de imagen, sistemas interactivos, teoría de la computación y el sistema cognoscitivo humano. Idea que nace en 1970, teniendo a la fecha aproximadamente seis años de desarrollo; integrando once grupos en un único laboratorio interdisciplinario:

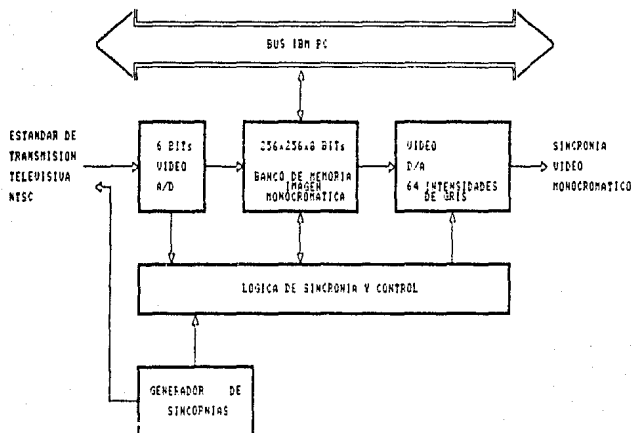
Publicación Electrónica,  
Investigación del Aprendizaje,  
Televisión Avanzada,  
Música por Computadora,  
Imágenes Espaciales,  
Gráficas,  
Interfaz Hombre Máquina,  
Telecomunicaciones,  
Películas, Video y Animación,  
Gráficas por Computadora y  
Computadoras y Entretenimiento.

Mientras que cada grupo resalta en forma diferente el desarrollo del contenido contra el medio o canal propio, su propósito común es dar un nuevo panorama a las tecnologías del medio.

Los grupos de investigación relacionados con lo que es ahora la Ciencia de la Visión, que Media Laboratory engloba son:

Programa de Investigación de IV Avanzada,  
Publicación Electrónica,  
Películas del Futuro,  
Imágenes Espaciales (Holografía),  
Gráficas por Computadora y Animación,  
Interfaz Humana,  
Lenguaje de Lengua Visible y  
Ciencia de la Visión.

## INTERFACE DIGITALIZADORA



DESCRIPCION FUNCIONAL DE LA TARJETA DIGITALIZADORA DE VIDEO  
CON ESTANDAR DE TRANSMISION TELEVISIVA NTSC (IMP-DP1).

FIGURA B.1

**IMP DIP-06124 TARJETA DIGITALIZADORA DE VIDEO  
MONOCROMATICO PARA PC**

**Características**

- . Digitalizadora de video en tiempo real de bajo costo con resolución de 256x238 pixels por línea, compatible a bus de IBM PC/XT.
- . Acepta formato de entrada NISQ de cámara de video estándar o cámara de estado solido CCD.
- . Digitaliza un cuadro cada treintavo de segundo, con una precisión de 6 bits por pixel de niveles de cuantificación.
- . Almacenamiento en la tarjeta mapeable a RAM de la PC.

**Descripción**

La **IMP-DIP** es una tarjeta digitalizadora de video monocromático de bajo costo, con resolución espacial de 256x238 pixels por línea, para adquisición de datos en tiempo real, conectable a cualquier ranura de expansión IBM PC, PC/XT. Esta tarjeta periférica digitaliza una entrada de video compuesto en el estándar NISQ proveniente de una cámara de video o una cámara de estado sólido CCD y emite una salida de video compuesto de imágenes monocromáticas a 64 niveles de gris. La arquitectura de la **IMP-DIP** se caracteriza por su almacenamiento por cuadro de alta velocidad, controlada por el microprocesador anfitrión.

**Entrada de Video**

La **IMP-DIP** digitaliza y despliega un cuadro entero de 256x256 en un 1/30 de segundo. La señal de entrada de video es digitalizada por un convertidor analógico digital tipo flash operando a una frecuencia de 10MHz con una precisión de valores discretos de 6 bits por pixel. Cada valor discreto representa uno de los 64 niveles de cuantificación posibles en la escala de gris.

**Sincronización de Video**

Un grupo de componentes de la tarjeta **IMP-DIP** generan las sincronías horizontal y vertical la cual sincronizan la señal de entrada de video compuesto, diseñado para aceptar entrada de video NISQ de una variedad de fuentes incluyendo cámaras de video estándar y cámaras de estado sólido CCD sin sacrificar ancho de banda. La figura B.1 ilustra la disposición de los componentes de sincronía y control.



GLOSARIO

**Acomodación**, proceso de adaptación del cristalino, que permite enfocar las imágenes sobre la retina; con ello se consigue una visión nítida de los objetos observados.

**Adaptación**, proceso de contracción o dilatación de la pupila en su función reguladora de la cantidad de luz que entra en el ojo.

**Adquisición de Datos**, la recopilación de información de fuentes tales como sensores y transductores de una forma precisa, coordinada y organizada. Los sistemas modernos convierten esta información a datos digitales los cuales pueden ser almacenados y procesados por una computadora.

**Algoritmo**, voz utilizada en la Edad Media para indicar un procedimiento de cálculo numérico efectuado mediante el uso de cifras árabes, el moderno significado es mucho más amplio, indica esquema genérico de cálculo literal o numérico. Un conjunto de reglas o plan detallado, con un número finito de pasos, para resolver un problema. Un algoritmo puede ser usado como un modelo para un programa de computadora.

**Aliasing**, la clase de interpretación errónea que resulta de que la densidad de los píxeles es muy baja para representar las frecuencias espaciales en una imagen.

**Almacenamiento de Acceso Directo**, dispositivo en que cada registro físico tiene una posición determinada y una dirección única.

**Amplitud**, indica el valor máximo de un fenómeno. En un fenómeno oscilatorio, tanto puro como sinusoidal o compuesto, indica el valor máximo (absoluto) alcanzado por el mismo en el curso de las oscilaciones.

**Análisis Homomórfico**, una operación no lineal que utiliza la propiedad de superposición de la convolución para extraer los componentes originales de la señal.

**Análisis Harmónico**, estudia el desarrollo de una función periódica en serie de Fourier, o sea, el análisis de las funciones sinusoidales (en particular sus amplitudes, fases y periodos), de las cuales la función periódica puede ser considerada la suma. Se demuestra que el desarrollo en serie de Fourier se realiza bajo condiciones generales extremadamente amplias, por lo que casi todas las funciones periódicas continuas que tienen aplicaciones prácticas pueden ser consideradas como suma de adecuadas funciones sinusoidales. Las funciones periódicas sinusoidales en cuestión se denominan armónicas de la función analizada.

**Análisis de Escena**, concierne con la transformación de descripciones simples, obtenidas directamente de imágenes a descripciones más elaboradas, que sean útiles para una tarea en particular. De esta forma una descripción simbólica compleja de la imagen puede ser obtenida de una descripción simple. La información inicial no es una imagen y la metodología de análisis no se relaciona directamente con la visión artificial. El análisis de escena es también conocido como *Visión Computacional* o *Comprensión de Imágenes*, proceso en el que de forma integral, la entrada es una imagen y la salida es una descripción simbólica de la escena.

**Analogía**, similitud existente entre órganos, sistemas o estructuras consistentes en que estos desempeñan la misma función aun cuando no exista homología entre ellos.

**Angström**, unidad de longitud usada en física; equivale a  $1 \times 10^{-7}$  milímetros.

**ANSI**, acrónimo de *American National Standards Institute*.

**Aprendizaje**, cualquier modificación sistemática en el modo de reaccionar de un organismo frente a una situación que ya ha sido experimentada precedentemente.

**Aproximación**, grado de exactitud obtenido, al efectuar una medida directa o por medio del cálculo, en la determinación del valor más probable de una magnitud. En general, la diferencia entre el valor exacto de una magnitud y su valor aproximado recibe el nombre de error absoluto o error de aproximación.

**Arquitectura**, es el arte de construir y de hacer funcionar a las computadoras. Constituidas éstas por el equipo físico (*hardware*) y unos programas de base (*software*), necesarios para la gestión de esta máquina, y es además una aplicación, es decir, programas especialmente concebidos que permiten utilizar el equipo y los programas base con un objetivo preciso.

**ASCII**, acrónimo de *American Standard Code for Information Interchange*, código estándar de ocho bits para intercambio de datos entre sistemas de procesamiento de datos, sistemas de comunicaciones y equipos asociados.

**Autocorrelación**, una representación matemática del grado de correlación entre muestras de una sola señal.

**Automatización**, la aplicación de procesos por medios automáticos. La conversión de un procedimiento, un proceso o un equipo al funcionamiento automático.

**Bastones**, células fotorreceptoras de la retina, son muy sensibles a la luz y sirven para captar las formas de los objetos y la intensidad luminosa; son los responsables de la visión escotópica, y en combinación con los conos de la captación visual.

**Binario**, relativo a una característica o a una propiedad que implica una selección o una condición en la que hay dos posibilidades. Sistema de representación numérica que incluye los dígitos binarios 0 y 1.

**Bit**, contracción de 'binary digit' (dígito binario), es la unidad más pequeña de información. Unidad de medida de información, basada en la elección de dos posibilidades.

**Bloque Imagen**, cualquier área de **RAM** usada para almacenar una imagen. Un conjunto de pixels manejados como una unidad.

**Booleano**, el álgebra booleana es un sistema deductivo o proceso de razonamiento nombrada en honor al matemático inglés George Boole. Es un sistema de teoremas de lógica simbólica para denotar clases de elementos, proposiciones de falso o verdadero y elementos de circuitos lógicos encendido o apagado. Los símbolos son usados para representar operadores tales como Y, O, NO, EXCEPTO, SI ENTONCES, etcétera. Este sistema es ahora reconocido como un método efectivo para manipular funciones de valores simples con dos posibles estados de salida, cuando el álgebra booleana es aplicada a la aritmética binaria, los dos estados son 0 y 1.

**BUS**, conductores usados para interconectar la circuitería individual en una computadora, los conductores como una unidad son llamados bus.

**Byte**, un conjunto de bits binarios consecutivos que funcionan como una unidad, lo más frecuente es que se trate de ocho bits que representan un carácter.

**Caja Negra**, término genérico que se utiliza para describir un dispositivo no especificado o un punto de trabajo que realiza una función dada y donde las entradas conocidas producen salidas conocidas en una relación fija.

**Calidad**, parámetro o factor que califica el grado de bondad de una imagen. Lógicamente, sólo puede tratarse de un dato comparativo, expresado mediante ciertos coeficientes, capaz de suministrar una información cuantitativa o establecer una escala de las características de la imagen. Es necesario definir, para cada caso particular, el parámetro conveniente y los coeficientes utilizados.

**Campo**, en un sistema de entrelazado televisivo, es el conjunto de líneas pares o impares en la cual un cuadro está dividido.

**Canal de Comunicación**, una trayectoria por la que se pueden enviar señales. Se denomina también circuito, línea o cable.

**Capacidad de Almacenamiento**, la cantidad de datos que pueden incluirse en un dispositivo de almacenamiento.

**Caracterización**, es la etapa de concentrar el máximo de información, conservando sólo lo esencial, se le conoce también como etapa de extracción de primitivos o de características.

**CCIR**, acrónimo de **Consultative Committee International Radio**, estándar de transmisión televisiva de 1/25 segundo por trama observado por los países de Europa.

**Clasificación**, dado varios descriptores de prototipos y la imagen de un objeto desconocido, es el problema de determinar a que clase pertenece tal objeto. Distribuir conceptos en grupos según reglas definidas.

**Compilador**, un tipo particular de lenguaje de alto nivel usado para preprocesar un programa para convertirlo en una forma que el procesador pueda ejecutar directamente.

**Computador Analógico**, tipo de computadora (o maquina logica) que resuelve problemas relacionados con el principio de analogía entre sistemas físicos. Para ello utiliza la posibilidad de establecer una correspondencia continua entre entes matemáticos y magnitudes físicas continuamente variables y oportunamente escogidas.

**Computador Digital**, computadora en la que se utiliza representación discreta (digital) de datos.

**Concurrente**, programas (software) que puede desarrollar más de una tarea simultáneamente.

**Conos**, células fotorreceptoras que se encuentran en la retina responsables de la **visión fotópica**; junto con los bastones permiten la captación visual. La densidad de conos por unidad de superficie de la retina es mayor en la fovea y en sus alrededores que en los bordes de la retina, en donde hay pocos o ninguno.

**Conversión Analógico Digital (AZD)**, el proceso de cambiar una señal analógica a un valor digital que representa la magnitud de la señal en el momento de la conversión.

**Convertidor Analógico Digital (A/D o ADC)**, un dispositivo electrónico, a menudo un circuito integrado, que produce una salida digital directamente proporcional a una señal analógica de entrada.

**Conversión Digital Analógica (D/A)**, el proceso de cambiar datos discretos en una señal continuamente variante. Sus usos comunes son presentar la salida de una computadora digital como un despliegue gráfico o como una prueba de estímulos.

**Convertidor Digital Analógico (D/A o DAC)**, un dispositivo que convierte la información digital en un correspondiente voltaje o corriente analógica.

**Convolución**, en la técnica de los servosistemas y de las comunicaciones, tiene importancia conocer la magnitud del tiempo de la respuesta del sistema en examen a las señales efectuadas. Uno de los más eficaces métodos matemáticos es el de la integral de convolución, cuya expresión viene dada por:

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

- $r(x)$   $\equiv$  función respuesta,
- $f(\alpha)$   $\equiv$  función propuesta,
- $g(x)$   $\equiv$  función peso constituida por la respuesta característica del sistema a una señal impulsiva unitaria.

**Coprocesador**, otra unidad de proceso que opera en conjunción con el CPU estándar, pueda ser usado para incrementar la velocidad de ejecución. Por ejemplo el 2021 está diseñado para realizar aritmética de punto flotante con 32 bits de precisión.

**Correlación**, cuando dos magnitudes variables están ligadas por una relación de interdependencia que puede incluso no estar exactamente definida, tal relación se determina mediante el examen de coeficiente o función de correlación que viene dada por la integral de convolución entre las dos funciones que representan la magnitud en estudio. Cuando el procedimiento se aplica a una sola función, en el sentido de investigar la relación entre los valores de la misma función separados por un intervalo dado, se tiene la función o coeficiente de autocorrelación. El grado de interrelación entre dos señales.

**CPU**, acrónimo de **Central Processing Unit**, la parte de la computadora que realiza el cálculo y control de la información. Parte central del sistema de la computadora que desarrolla operaciones sobre los datos. En las computadoras personales el CPU es típicamente un circuito integrado llamado microprocesador.

**Cuadro**, es el número total de líneas de rastreo que representan una imagen. El estándar occidental se caracteriza por una resolución de 525 líneas útiles por trama completa, repartidas en 2 medias tramas entrelazadas sobre una imagen rectangular.

**Quantificación**, es el mapeo de valores de brillantez y color a números enteros. Cuando una señal analógica es muestreada, los valores obtenidos deben de ser representados por un número finito de bits, que representan la precisión de la imagen, disponibles en el uso de computadoras; este proceso es llamado cuantificación y puede ser considerado un mapeo de números reales a un rango de enteros, denominados niveles de gris.

**Default**, un valor asignado o una acción tomada automáticamente a menos que otra cosa se especifique.

**Descripción**, en la etapa de descripción se debe de obtener para cada objeto segmentado las características primitivas o atributos que permitan formar un modelo matemático de forma.

**Diagrama de flujo**, es una representación gráfica de la definición o solución de un problema, en la cual los símbolos son usados para representar funciones, operaciones y flujo de ejecución. Contiene los pasos lógicos en un programa tal que el diseñador pueda conceptualizar y visualizar cada paso, define las fases mayores del proceso, también como el camino a la solución del problema.

**Digital**, término equivalente a numeral (del inglés digit, cifra numérica) que caracteriza a las computadoras que manipulan magnitudes expresadas en un sistema numérico de base dada (binario, decimal).

**Digitalizar**, es el proceso de convertir las amplitudes de una señal analógica (en este caso de video), a valores digitales. Una imagen digital es un arreglo bidimensional de números que representan las características de una escena.

**Dioptría**, unidad de potencia de una lente, unidad de vergencia de los sistemas ópticos (símbolo  $\delta$ ), que equivale a la vergencia de un sistema óptico cuya distancia focal es de 1 metro, en un medio cuyo índice de refracción es 1.

**Direccionamiento de Bits Invertidos.** un modo de direccionamiento que facilita los cálculos del algoritmo **Coolay & Lukay** de la transformada rápida de Fourier, reordenando la dirección de entrada o de salida esquemáticamente representado por el diagrama mariposa.

**Display.** el dispositivo en el cual una imagen es convertida de señales eléctricas o ópticas; típicamente un monitor de televisión.

**Edición.** involucra el borrado, inserción y rearrreglo de los píxeles que constituyen una imagen.

**Entrelazado Televisivo.** es el medio por el cual una imagen es rastreada en formato de video estándar, donde los campos impar y par son desplegados alternativamente.

**Error de Cuantificación.** la inherente incertidumbre en digitalizar un valor analógico debido a la precisión finita del proceso de conversión. Este error puede ser reducido sólo incrementando la precisión del convertidor. Error causado por representar un número con un limitado número de bits, lo cual resulta en reducida precisión.

**Espectro de Fourier.** imágenes de los armónicos (componentes sinusoidales) de una señal compleja, logradas llevando dichos armónicos sobre un diagrama cartesiano, que tiene por abscisas las frecuencias y por ordenadas las amplitudes de onda.

**Estabilidad.** la habilidad de un instrumento o sensor para mantener una salida consistente cuando una señal de entrada es constante.

**Esteroscopia.** método de adquisición de imágenes de forma binocular, logrando así un par de imágenes idénticas con diferencias de ángulo visual definidas. Útil para determinar profundidad o distancia de objetos tridimensionales. Es la medida de la distancia que permite a nuestro cerebro estimar mediante triangulación, las coordenadas del punto en el espacio, de esta manera, asociando dos a dos los puntos de las imágenes retinianas, aparecen las nos permite apreciar el relieve.

**Filtro.** es una operación que cambia las características espaciales y de intensidad de una imagen; se aplican en dos tipos de dominios diferentes:

Dominio Espacial

Dominio de Frecuencia Espectral

**Filtro**, en la moderna teoría de conjuntos, filtro sobre un conjunto  $\mathcal{Q}$  es un conjunto  $\mathcal{F}$  de partes de  $\mathcal{Q}$ , que posee las siguientes propiedades:

Toda parte de  $\mathcal{Q}$  que contiene un conjunto de  $\mathcal{F}$  pertenece a  $\mathcal{F}$ .

Toda intersección finita de conjuntos de  $\mathcal{F}$  pertenece a  $\mathcal{F}$ .

La parte vacía de  $\mathcal{Q}$  ( $\emptyset$ ) no pertenece a  $\mathcal{F}$ .

**Filtro Activo**, un filtro electrónico que combina dispositivos de circuitos activos, usualmente amplificadores, con circuitos pasivos tales como resistores y capacitores. Los filtros activos típicamente tienen características que corresponden fielmente a filtros de correspondencia de lo que lo hacen estrictamente los filtros pasivos.

**Filtro Adaptativo**, una clase de filtros cuyos coeficientes son actualizados acorde a un criterio de desarrollo.

**Filtros Pasivos**, circuito electrónico que utiliza resistores, capacitores e inductores.

**Fotorreceptores**, dispositivos sensibilizados para la percepción de estímulos luminosos.



**Fourier Análisis de.** teoría de gran importancia en el estudio del funcionamiento y regulación de los circuitos lineales; permite determinar la réplica del circuito a una excitación cualquiera, cuando se conoce la respuesta a la excitación sinusoidal.

**Fourier Transformada de.**

El análisis sinusoidal puede también ser aplicado a las funciones no periódicas, a condición de que sean continuas, las fórmulas:

$$F(i\omega) = \int f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (a)$$

con

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int F(i\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (b)$$

es el par de transformadas de Fourier, las fórmulas de transformación y antitransformación respectivamente, por esto, mediante (a) una función continua puede ser obtenida como suma de infinitésimos del tipo:

$$F(i\omega) e^{-i\omega t} d\omega$$

que son términos sinusoidales cuya amplitud y cuyo defase están contenidos en  $F(i\omega)$ , la (a) es una de las formas de la integral de Fourier. Dada  $F(i\omega)$  se obtienen los espectros de amplitud y de fase de la función  $f(t)$ . La transformación que permite pasar de  $f(t)$  a  $F(i\omega)$  se llama transformación de Fourier y  $F(i\omega)$  se denomina transformada de  $f(t)$ . El proceso inverso constituye la antitransformación de Fourier, los dos procesos se indican con:

$$F(i\omega) = E [ f(t) ]$$

$$f(t) = E^{-1} [ F(i\omega) ]$$

**Fourier Teorema de.** una función periódica de pulsación  $\omega$  es igual a la suma de un término constante y de una serie de funciones sinusoidales cuyas pulsaciones son múltiplos enteros de  $\omega$ .

Una función periódica cualquiera de período  $I$  puede considerarse como la suma de funciones sinusoidales de períodos  $I, I/2, I/3, \dots$  con amplitudes y diferencias de fases perfectamente determinadas. (La función sinusoidal que tiene la misma frecuencia  $\omega$  que una función periódica cualquiera se llama fundamental; todos los demás términos de una serie de Fourier son armónicos de esta.

**Fóvea Centralis**, región de la retina que tiene una inervación máxima y una dotación de conos mayor que el resto de la retina. Su sensibilidad foto-fila es mayor que la del resto de la retina, que es más escotofila; se enfoca sobre el centro de la atención visual.

**Frecuencia**, número de veces que un fenómeno periódico se repite por unidad de tiempo. Cuando la unidad de tiempo es el segundo, la frecuencia se indica en hertz (Hz), llamados también ciclos por segundo.

**Función Periódica**, una función  $y=f(x)$  es periódica con periodo  $p$  si su dominio de definición contiene  $x+ip$ , cada vez que contiene  $x$  y si  $f(x+ip) = f(x)$ , para  $x$  que pertenece al dominio de  $f$ .

**Gráficas por Computadora**, o síntesis de imágenes, proceso caracterizado por que la entrada es una descripción de la escena y la salida es una imagen.

**Hardware**, la estructura mecánica, magnética, diseño electrónico y dispositivos de una computadora. Se refiere a los componentes físicos que constituyen un sistema computacional.

**Hexadecimal**, describe un sistema numérico cuya base es 16, usando los números 0 al 9 y las letras A a F.

**IEEE**, acrónimo de Institute of Electrical and Electronic Engineers.

**Iluminación**, efecto de la radiación luminosa que hace visibles los objetos; con el mismo nombre se designa el conjunto de dispositivos para obtenerlo en diferentes circunstancias utilizando fuentes luminosas naturales o artificiales. Cantidad de luz incidente sobre la escena observada.

**Imagen**, reproducción de la figura de un objeto formado por la reflexión o refracción de los rayos. Una función bivariable que describe cómo la brillantez de una imagen varía con respecto a su posición espacial.

**Imagen Digital**, dada la naturaleza numérica (digital) del procesamiento de información que efectúa una computadora, las imágenes de que se habla deben de estar codificadas numéricamente, los sistemas de visión por computadora perciben entonces un universo digital. Una imagen estará representada como un arreglo de bits, donde cada elemento de arreglo es un punto elemental de la imagen denominado usualmente pixel, al que se asocia un valor numérico relativo al nivel de brillo de dicho sitio, una imagen digital entonces está conformada de diferencias de brillantez que varían uniformemente en el espacio.

**Input/Output (I/O).** el proceso de transferir datos de o hacia el sistema de la computadora incluyendo canales de comunicación, interfaces, canales de adquisición y control de datos.

**Inteligencia Artificial.** es el estudio de las facultades mentales a través de modelos computacionales. Mientras que la inteligencia artificial concierne con el comportamiento en general que está relacionado con la inteligencia, no tiene que ver necesariamente con la forma de producir los resultados y en particular, los métodos pueden no ser aquellos empleados por el género humano.

**Intensidad.** es la fuerza (o potencia) de luz en un punto en particular en una imagen. Los píxeles representan valores de intensidad que son percibidos por el ojo como brillantez; (es la relativa brillantez de un color).

**Interface.** dispositivo que permite a la computadora operar en una línea de comunicación, una terminal o con elementos periféricos.

**Intérprete.** un lenguaje formal de alto nivel en el cual las instrucciones codificadas son convertidas una a la vez, para ser usadas, en código que pueda ser usado por el procesador.

**Lag.** persistencia de la carga de una imagen sobre los subsiguientes cuadros.

**Lenguaje máquina.** código binario que es ejecutable directamente por el procesador central de la computadora y trasladado en acciones electrónicas; el lenguaje de máquina es diferente para cada procesador central distinto.

**Línea.** en la técnica de televisión, toda ascensión o exploración en sentido horizontal sobre la imagen reproducida o por producir; el número de líneas es de 525 para el estándar occidental.

**Linealidad.** la adherencia de la respuesta de un dispositivo a una relación lineal.

**Macro instrucción.** un pequeño conjunto de pasos de programa combinados para actuar como un programa sencillo y poderoso, de un solo paso.

**Matriz.** una disposición rectangular y dimensional de cantidades, las matrices se manipulan según las reglas del álgebra matricial. Los elementos que componen la matriz de píxeles son las líneas de la imagen y las columnas son las muestras a lo largo de cada imagen.

**Memoria.** dispositivos electrónicos que habilitan a la computadora a almacenar y acceder información. En un sentido amplio, la memoria se refiere a cualquier componente de **hardware** que sirva para ese propósito, como discos, cintas o almacenamiento por medio de semiconductores.

**Memoria Cache.** memoria rápida usada para mejorar el desarrollo del procesador central. Las instrucciones que serán ejecutadas son ubicadas en memoria cache un poco antes de ser necesitadas, este proceso acelera la operación del procesador central.

**Modelo Matemático.** representación matemática de un proceso, un dispositivo o un concepto.

**Muestreo,** es la selección, a partir de la continuidad del espacio, de una trama discreta que representa una imagen. La técnica del muestreo consiste en representar la serie completa de valores parciales por medio de una parte del conjunto original, cuya extensión sea finita y con límites suficientes para obtener información precisa, calculando la brillantez promedio de un conjunto de valores vecinos llamados pixels.

**Multitarea,** la característica de un sistema operativo que permite al procesador desarrollar varias operaciones a la vez.

**Mundo real,** se refiere a eventos, señales y condiciones que ocurren naturalmente o en la vida cotidiana.

**NASA,** acrónimo de National Aeronautics and Space Administration.

**NOAA,** acrónimo de National Oceanic and Atmospheric Administration.

**NTSC,** acrónimo de National Television Systems Committee, estándar de transmisión televisiva de 1/30 segundo por trama observado por EE.UU., Canadá, Japón, México y la mayoría de los países del hemisferio occidental.

**OCR,** acrónimo de Optical Character Recognition.

**Operador,** símbolo usado para desarrollar cálculos aritméticos.

**Operador Lógico.** los operadores lógicos desarrollan operaciones lógicas o booleanas sobre valores numéricos, son usados para conectar dos o más relaciones y regresar un valor de verdadero o falso para ser usado en una decisión. Un operando de un operador lógico es considerado verdadero si no es igual a cero o falso si es igual a cero. Los operadores lógicos son: NO (complemento lógico), Y (conjunción), O (disyunción), XOR (O exclusiva), IMP (implicación) y EQV (equivalencia).

**Paralelo,** relativo a la producción simultánea de dos o más actividades relacionadas en canales o dispositivos múltiples. Simultaneidad de dos o más procesos.

**Periféricos,** los dispositivos de input/output y de almacenamiento conectados a la computadora, tales como controladores de discos, impresoras, teclados, sistemas de adquisición de datos, etcétera.

**Pixel,** es la más pequeña unidad de almacenamiento en una imagen digital direccionada por unidades de coordenadas horizontales y verticales o localización en una imagen (sinónimo picture element, pel, etcétera).

**Precisión,** es el número de bits de exactitud o número de niveles de cuantificación que pueden ser representados en un pixel; la encodificación binaria de un pixel representa una aproximación a la señal de la cámara en el punto respectivo, con los bits más significativos dando una amplia información de amplitud y progresivamente refinando la aproximación hacia los bits de bajo orden; el más pequeño número significativo en el cual una cuantificación puede ser determinada.

**Proceso de Imágenes,** concierne con la generación de nuevas imágenes, por medio de una secuencia sistemática de operaciones a partir de imágenes existentes. La mayoría de las técnicas usadas vienen de la Teoría de los Sistemas Lineales. La nueva imagen puede tener ruido suprimido, movimiento o corrimiento removido o contornos acentuados, el resultado sin embargo es aún una imagen, usualmente para ser interpretada por una persona. Algunas de las técnicas de Proceso de Imágenes son útiles para el entendimiento de las limitaciones de sistemas de formación de imágenes y para el diseño de módulos de preproceso. La compresión, restauración, realce y reconstrucción constituyen los principales elementos del Proceso de Imágenes. El Proceso de Imágenes es la ciencia de analizar y cambiar imágenes para uso humano y artificial.

**Programación Modular,** método para abordar la programación de computadoras que separa el programa total en módulos y escribe y depura cada módulo de manera independiente antes de combinarlos en un programa simple.

**Radix 2 FFT.** algoritmo de la transformada rápida de Fourier que usa dos entradas y dos salidas para cada cálculo de mariposa.

**RAM.** acrónimo de Random Access Memory, memoria de acceso aleatorio. Memoria de la computadora que permite que los datos sean leídos o escritos en una localidad particular sin tener que acceder secuencialmente a través de las localidades precedentes.

**Realce.** es el intento de mejorar la apariencia de una imagen para interpretación humana o subsecuente proceso. Las técnicas de realce han realmente resultado de la potencia y generalidad provista por una computadora de propósito general.

**Reconocimiento.** es el proceso por el cual la imagen de un objeto es comparada con modelos de objetos conocidos para determinar el más cercano parecido. En la mayoría de los casos, los modelos o prototipos son construidos por un proceso de entrenamiento por muestra, presentando objetos al sistema para que parámetros de forma y tamaño sean calculados y almacenados. Identificación de formas o configuraciones por medios automáticos. Es una ciencia particular que engloba disciplinas como la Estadística multivariante, la Geometría, la Inteligencia Artificial y la Teoría de Transferencia Radiativa.

**Redundancia.** símbolos que en la transmisión de un mensaje, pueden considerarse superfluos respecto al número estrictamente indispensable de información, según la Teoría de la Información.

**Reflectancia.** cantidad de luz reflejada por los objetos de la escena.

**Relación Señal a Ruido.** en una línea de comunicación, es la razón de la fuerza de la señal con respecto al nivel de ruido.

**Resolución.** es el grado de detalle discernible de una imagen y es altamente dependiente a de la Resolución Espacial y la Precisión de Cuantificación.

**Resolución Espacial.** es el número de niveles en los cuales una imagen está dividida indicando la extensión horizontal y vertical en líneas por píxel respectivamente.

**Restauración.** es la reconstrucción de una imagen hacia un objeto (original) por la inversión de algunos fenómenos degradatorios.

**ROM**, acrónimo de **Read Only Memory**, memoria de la computadora en la cual los datos pueden ser rutinariamente leídos pero escritos sólo especialmente usando medios especiales cuando el ROM es manufacturado. El ROM es usado para almacenar datos o programas de forma permanente.

**Ruido**, perturbación visual, generalmente aperiódica, compuesta por un conjunto de puntos o manchas que en el dominio de las frecuencias tienen amplitud, frecuencia y fase variables, localizándose generalmente en la zona de las altas frecuencias espectrales, cuya mezcla da una sensación de imagen no nítida. Perturbación de un fenómeno regular y de degradación del contenido de la información. Interferencia indeseable a una señal, las fuentes de ruido incluyen la línea de CA, motores, generadores, transformadores, luces fluorescentes, tubos de rayos catódicos, computadoras, tormentas eléctricas, radio transmisores y otros.

**Saturación**, a veces llamada pureza, se define como término de mezcla entre blanco y un color puro.

**Secuencial**, relativo a la producción de eventos en una secuencia de tiempos, con poca o ninguna simultaneidad ni superposición de los eventos.

**Segmentación**, proceso cuyo objetivo es el de descomponer una imagen en regiones que corresponden a objetos o partes de un objeto. El objetivo es agrupar áreas de una imagen que posean características similares en distintas entidades que representen las partes de la imagen, por ejemplo límites o contornos, regiones o áreas.

**Sensitividad**, el mínimo de cambio en una señal de entrada que un instrumento puede detectar.

**Sensor**, un dispositivo que responde a estímulos físicos (calor, luz, sonido, presión, movimiento, etcétera) y produce una salida eléctrica correspondiente. Como dispositivo de captación visual se divide en sensores pasivos y activos, de los primeros se tiene como ejemplos: cámaras de televisión (de tecnología vidicon y arreglos ccd), sensores infrarrojos, arreglos lineales y cámaras de rastreo; de los segundos: rastreadores de luz estructurada, radares y rastreadores en base a laser.

**Simulación**, representación de ciertas características de la conducta de un sistema físico o abstracto mediante el comportamiento de otro sistema.

**Sincronización**, la coordinación de actividades de varios elementos de circuitería conjuntos.

**Sintaxis**, comparable a la gramática del lenguaje humano, la sintaxis es el conjunto de reglas usado para formar instrucciones de un lenguaje formal de programación en particular.

**Sistema**, una combinación de elementos, sus atributos y sus relaciones reciprocas, que se realizan en la persecución de un objetivo en común; (configuración de computadora).

**Sistema Operativo**, el programa de control maestro que gobierna la operación de un sistema de computadora.

**Software**, los programas, datos y rutinas para uso en una computadora digital, a diferencia de los componentes físicos. Término genérico para programas computacionales, es el componente lógico que constituye un programa o sistema.

**Tarjeta de Expansión**, una tarjeta de circuitos electrónicos conectable, que agrega características o capacidades más allá de las básicas de la computadora, tales como una tarjeta de adquisición de datos.

**Teorema de Muestreo de Nyquist**, si una señal continua de ancho de banda limitado no contiene componentes de frecuencia mayores que una frecuencia especificada entonces la señal original puede ser recuperada sin distorsión si su tasa de muestreo es al menos el doble de la frecuencia especificada. Mínimo de tasa de muestreo requerida para prevenir traslape (**aliasing**) de señal de frecuencias; ésta debe de ser mayor que o igual a dos veces la máxima frecuencia entrante. El muestreo debe de ocurrir al doble de la más alta frecuencia presente para mantener la fidelidad deseable.

**Teoría de Información**, rama del aprendizaje que se refiere a la probabilidad de la comunicación o a la transmisión exacta de mensajes, sujeta a fallas, distorsiones y ruidos. Se propone como objetivo estudiar la información y las modalidades de su transmisión, para permitir evaluar matemáticamente el rendimiento de los diferentes sistemas de comunicación. En la teoría de la información o teoría matemática de la comunicación, el término información no es el significado que cierto conjunto de símbolos pueda poseer para quien envía o recibe un mensaje, sino una cantidad específica de información del mensaje en cuestión, cualquiera que sea la forma en que ha sido emitido, el modo de transmisión y el sistema implicado.

**Tiempo de Conversión**, el tiempo requerido, del sistema de entradas o salidas analógicas, a partir del momento en que el canal es requerido (como por una instrucción de lectura) al momento en que el dato preciso está disponible. Esto podría incluir tiempo de conversión A/D, tiempo de adquisición, etcétera.



**Tiempo Real**, una operación o una función que es completada en un tiempo de un cuadro se dice desarrollada en tiempo real. Para televisión estándar (RS-170 National Television Systems Committee Standard) un tiempo de cuadro es de  $1/30$  de segundo. Los datos son procesados inmediatamente en lugar de ser acumulados y procesados posteriormente.

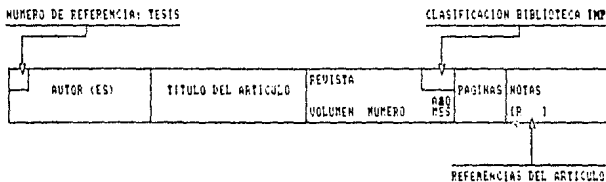
**Transductor**, dispositivo que lleva a cabo la transducción, definida por una función, que viene dada por la relación entre las magnitudes de entrada y las de salida; un dispositivo que convierte la longitud, posición, temperatura, presión, nivel, etcétera a diferentes formas de energía, es decir, voltaje o corriente.

**Visión Escotópica**, (visión nocturna) función realizada por los bastones los cuales están adaptados a la sensibilidad luminosa

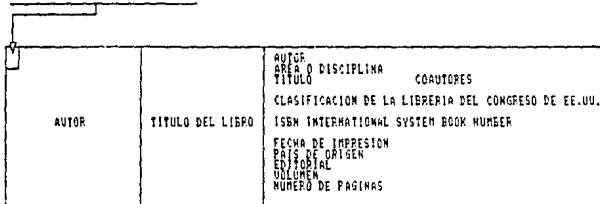
**Visión Fotópica**, (visión diurna) función realizada por los conos los cuales están adaptados a la sensibilidad cromática.

LA SIGUIENTE ES UNA GUIA DE LA NOMENCLATURA EMPLEADA EN LAS TABLAS DE REFERENCIA BIBLIOGRAFICA DEL APENDICE E.

LA MAYORIA DE LOS ARTICULOS CONSULTADOS SON DEL CENTRO DE INFORMACION PETROLERA DEL INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO.



ETIQUETA DE REFERENCIA: TESIS



BIBLIOGRAFIA		
AUTOR	TITULO	CLASIFICACION
<p><b>A</b></p> <p>LEE ADAMS</p>	<p>HIGH PERFORMANCE GRAPHICS IN C ANIMATION AND SIMULATION</p>	<p>Adams, Lee. High Performance graphics in C: animation and simulation/ by Lee Adams. p. cm. Includes 1. (Computer program language) 2. Computer graphics. I. Title.</p> <p>0476.73.C15A32 1988 006.6'765-dc19                  ISBN 0-8306-9349-1 (pbk.)                  First printing 1988. Blue Ridge Summit PA, USA. Windcrest Books, Division of TAB BOOKS Inc. pp. 518</p>
<p><b>B</b></p> <p>ROPLAND INTERNATIONAL, INC.</p>	<p>TURBO C REFERENCE GUIDE</p> <p>TURBO C USERS GUIDE</p>	<p>Borland International, Inc. 1500 Green Hills Road, Scotts Valley, CA 95066-0001. First printing 1987. USA.</p> <p>pp. TCRy 612 version 2.0 1988                  pp. TCU7 299 version 1.0</p>
<p><b>C</b></p> <p>ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA</p>	<p>HOMBRE, CIENCIA Y TECNOLOGIA</p>	<p>Encyclopaedia Britannica 8 volumes</p> <p>Título original: 'Enciclopedia Delle Scienze e Delle Tecniche'</p> <p>ISBN 84-7068-490-2 (obra completa)                  ISBN 84-7068-483-X (primera publicación)</p> <p>Ediciones Danes S.A., Barcelona España</p>
<p><b>D</b></p> <p>SONZALEZ RAFAEL C.</p>	<p>DIGITAL IMAGE PROCESSING</p>	<p>(Applied Mathematics and Computation) Includes bibliographies and index.</p> <p>1. Image processing. I. Mintz, Paul A., Joint author</p> <p>PA1632.G66 1977 621.38'8414 77-50317                  ISBN 0-201-02516-5                  ISBN 0-201-02517-3 (pbk.)</p> <p>Sixth printing, 1983. Reading, Massachusetts USA. Addison-Wesley Publishing Company Vol. 13 pp. 431</p>
<p><b>E</b></p> <p>HORN BERTHOLD KLAUS FAUL</p>	<p>ROBOT VISION</p>	<p>(MIT Electrical Engineering and Computer Science Series). Bibliography: p. Includes index.</p> <p>1. Robot vision. I. Title. II. Series.</p> <p>TZ11.L3.H67 1986 620.92 85-18137                  ISBN 0-262-08163-3 (MIT Press)                  ISBN 0-87-020317-2 (McGraw-Hill)</p> <p>First printing, 1986. Cambridge, Massachusetts London England. MIT Press. pp. 589</p>

## BIBLIOGRAFIA

AUTOR	TITULO	CLASIFICACION
<b>F</b> JOHNSON NELSON	<b>ADVANCED GRAPHICS IN C: PROGRAMMING AND TECHNIQUES</b>	Nelson Johnson Advanced graphics in C: Programming and techniques Bibliography: p. Includes index 1. Computer graphics. I. Title. ISBN 0-07-881257-7 First printing 1987. Berkeley, California USA. Osborne McGraw-Hill vol. 257 pp. 670
<b>G</b> KERNIGHAN BRIAN W.	<b>EL LENGUAJE DE PROGRAMACION C</b>	Brian W. Kernighan El lenguaje de programación C (traducción) Bibliografía incluye índice I. Programación II. Título ISBN 0-13-110163-3 (ISBN 960-880-024-4 original) Primera reimpresión 1985, Mexico D.F. Prentice Hall Hispanoamericana S.A. pp. 235
<b>N</b> NEJIA POZOS ERASMO	<b>EL FILTRO DIGITAL</b>	Instituto Mexicano de Petroleo. Subdireccion de Tecnologia de Exploracion Geofisica, Seccion de Investigacion (Divulgacion). Publicacion No. 78 AG-855. 1978 Clasificacion IMP 11389 pp. 31
<b>I</b> NIBLACK WAYNE	<b>AN INTRODUCTION TO DIGITAL IMAGE PROCESSING</b>	Niblack, Wayne An introduction to digital image processing. 1. Image processing - Digital techniques I. Niblack, Wayne Tel632 821 32 0414 ISBN 0-13-302674-3 First published 1985 Prentice-Hall International (UK) Ltd pp. 215

BIBLIOGRAFIA					
	AUTOR (EE)	ARTICULO	REFERENCIA	PP	NOTAS
1	Gerald J. Agin	Computer Color Systems for Industrial Inspection and Assembly	Computer Vol. 13 No. 3	1980 MAR	11 - 20 (r 17)
2	Harry C. Andrews	Digital Image Restorations & Survey	Computer Vol. 13 No. 4	1978 MAY	5 (r 23)
3	Harry C. Andrews	Digital Image Processing	IEEE Spectrum Vol. 12 No. 4	1975 SEP	5 (r 25)
4	John F. Amus	Digital Image Processing in Art Conservation	Byte Vol. 11 No. 1	1977 JAN	10 (r 25)
5	N. Abrams A. Wahle	Recent Developments in Lithologic Mapping using Remote Sensing Data	International Geologic Abstracts Vol. 19 No. 1	1977 FEB	17 177-180 (r 25)
6	Salvador Alvarez Eduardo Rodolfo Marín Campos	Diseño de Filtros Adaptativos para Señales Espaciales de Conductión	IEEE PAMI	1977 JUN	10 (r 26)
7	Harry C. Andrews Veneth L. Caspari	A Generalized Technique for Spectral Analysis	IEEE Transactions on Computers Vol. 17 No. 1	1968 JAN	10 11 - 15 (r 26)
8	Eric E. Rubanel Keith B. Oldham	Fourier Smoothing	Byte Vol. 11 No. 1	1977 FEB	7 10-11 (r 26)
9	Lee Baldwin	Color Considerations	Byte Vol. 10 No. 5	1976 MAY	11 12-13 (r 26)
10	Janet J. Barron	The Wizards of the Media Lab	Byte Vol. 14 No. 13	1979 DEC	6 15-16 (r)
11	Sidney Bertman	On the Derivation of the Fast Fourier Transform	IEEE Transactions on Audio Electro Acoustics Vol. 16 No. 1	1968 MAR	4 55 - 58 (r 27)
12	Ronald Bracewell	The Fast Hartley Transform	Proceedings of the IEEE Vol. 72 No. 6	1974 NOV	4 1010 - 1016 (r 27)
13	Andrés Burg	Satélites de Aplicaciones	Monotza AFO VIII No. 3	1983	7 12 - 19 (r 31)
14	Harry G. Barrow Jay N. Tenenbaum	Computational Vision	Proceedings of the IEEE Vol. 69 No. 5	1981 MAY	24 572-595 (r 31)
15	B. F. Bojert J. W. Cooley Richard L. Garwin C. N. Fader	The 1968 Arden House Workshop on Fast Fourier Transform Processing	IEEE Transactions on Audio Electro Acoustics Vol. 17 No. 2	1969 JUN	10 66 - 75 (r 31)
16	Maurice Eriot Arnaud Robert de Saint Vincent	La Vision de los Robots	Mundo Científico (La Recherche) Vol. 5 No. 53	1979 ENE	10 1206 - 1209 (r 31)

MEMEORAFIA

	AUTOR (ES)	ARTICULO	REFERENCIA	FF	NOTAS
17	C. Sidney Burrus Michael Heideman Douglas L. Jones Henrik V. Sorenson	On Computing the Discret Hartley Transform	IEEE Transactions on Speech and Signal Processing 1995 Vol. 33 No. 4 OCT	119 1231 - 1238	8 FMT (r 15)
18	Enrique Calderon Rizati	La Proxima Generacion de Computadoras	Comunicaciones No. 8 1981 MAY	7 13 - 19	desarrollo historico (s)
19	Clark A. Calkins	Image Processing with a Printer	Byte Vol. 7 No. 2 1981 FEB	859 1991 220-248	15  (r 6)
20	Jean Chorowicz	Importance of Pattern Recognition for Geological Remote Sensing Applications	International Petroleum Abstracts 1984 MAR	665 19 - 39	(r 4)
21	T. H. Cannon B. R. Hunt	Image Processing by Computer	Scientific American Vol. 245 No. 4 1981 OCT	267 136-145	9 (r -)
22	Chung Ching Chen Werner Frei	Fast Boundary Detection: A Generalization and a New Algorithm	IEEE Transactions on Computers Vol. 26 No.10 1977 OCT	126 988-998	11 (r 8)
23	J. U. Cooley P. A. W. Lewis P. D. Welch	The Fast Fourier Transform and its Applications	IEEE Transactions on Education Vol. 13 No. 1 1969 MAR	127 27 - 34	8 (r 14)
24	J. U. Cooley P. A. W. Lewis P. D. Welch	The Finite Fourier Transform	IEEE Transactions on Audio Electro Acoustics Vol. 17 No. 2 1969 JUN	119 77 - 85	9 (r 8)
25	Gabriel Corkidi Carlos Garcia M.	Sistema Digital de Adquisicion y Despliegue en Tiempo Real de Imagenes	Instrumentacion y Desarrollo Vol. 5 No. 1 1985	14 38 - 51	(r 22)
26	Thomas H. Crystal Leonard Ehrman	The Design and Applications of Digital Filters with Complex Coefficients	IEEE Transactions on Audio Electro Acoustics Vol. 16 No. 3 1968 SEP	119 315-320	6 (r 9)
27	Benjamin N. Dawson	Introduction to Image Processing Algorithms	Byte Vol. 13 No. 3 1987 MAR	859 169-186	11 (r 5)
28	Benjamin N. Dawson	Changing Perceptions of Reality	Byte Vol. 14 No.13 1988 DEC	559 293-303	8 (r 3)
29	C. Dean Flatt	Northern Chihuahua LandSat	International Petroleum Abstracts 1986	665 149-151	3 (s)
30	Phil Dunbar	Machine Vision	Byte Vol. 12 No. 1 1986 JAN	859 161-173	10 (s)
31	Benjamin N. Dawson Harti Spalding	Finding the Titanic	Byte Vol. 12 No. 3 1986 MAR	859 96 -118	12 (s)
32	Fred M. Dickey James A. Green M. Sar Shanmugan	An Optimal Frequency Domain Filter for Edge Detection in Digital Pictures	IEEE Transactions on Pattern Anal. and Machine Int Vol. 1 No. 1 1979 JAN	357 37 - 49	13 (r 17)

BIBLIOGRAFIA					
AUTOR (ES)	ARTICULO	REFERENCIA	FF	NOTAS	
33 J. A. Bune W. J. Spraden T. C. Fandlreich F. M. Fultz W. Stromberg	Digital Processing of the Mammals and Pictures	Journal of Geophysical Research Vol. 8 No. 1 JUN	474 1973 394-417	11	[r 4]
34 Gerad Ursinus Isabelle Guyon Leon Personnaz	Las Maquinas Neuronales	Mundo Cientifico (La Recherche) Vol. 9 No. 67 ENE	415 1989 61 - 68	7	descripcion de arquitecturas computacionales prototipo
35 Data Translation	Applications Proliferate as Digital Image Processing enters Mainstream	Data Translation Image Processing Handbook 1989/1989 JAN	5 51 - 13	5	[s]
36 Data Translation	Fc Based Image Processing	Data Translation Image Processing Handbook 1988/1989 JAN	3 46 - 58	3	[s]
37 Data Translation	Image Processing with the IBM Fc	Data Translation Image Processing Handbook 1989/1989 JAN	7 66 - 72	7	[s]
38 Data Translation	Image Processing in the Reconnaissance Revolution	Data Translation Image Processing Handbook 1988/1989 JAN	4 76 - 79	4	[s]
39 Data Translation	Video Adds-Ons tap the IBM Fc for Inspection Tasks	Data Translation Image Processing Handbook 1988/1989 JAN	6 80 - 85	6	[s]
40 Data Translation	Micros Invade Nuclear Medicine	Data Translation Image Processing Handbook 1988/1989 JAN	2 86 - 87	2	[s]
41 Data Translation	Inexpensive Frame Grabbers Herald the Automated Factory of the Future	Data Translation Image Processing Handbook 1988/1989 JAN	6 96 -101	6	[s]
42 Data Translation	Highlighting Halley's	Data Translation Image Processing Handbook 1988/1989 JAN	6 102-104	6	[s]
43 Gary Elfring	Choosing a Programming Language	Byte Vol. 11 No. 6 JUN	859 1985 225-240	4	tecnicas de programacion [s]
44 Oliver Faugeras	Las Maquinas de Vision	Mundo Cientifico (La Recherche) Vol. 9 No. 67 ENE	415 1989 30 - 38	9	[r 4]
45 Geoffrey C. Fox Paul C. Messina	Arquitecturas Avanzadas de Computadoras	Investigacion y Ciencia No. 135 DIC	267 1987 24 - 32	9	[r 6]
46 David Galernter	Programas para Computacion Avanzada	Investigacion y Ciencia No. 135 DIC	267 1987 52 - 61	10	[r 6]
47 J. A. Glassman	A Generalization of the Fast Fourier Transform	IEEE Transactions on Computers Vol. 19 No. 2 FEB	126 1970 105-116	12	[r 9]
48 Patrick Gressay	El Ordenador Celular	Mundo Cientifico (La Recherche) Vol. 9 No. 67 ENE	415 1989 46 - 53	8	descripcion de automatas celulares

## BIBLIOGRAFIA

AUTOR (ES)	ARTICULO	REFERENCIA	PP	NOTAS	
49) William E. Green Douglas A. O'Hanley	Recent Developments in Digital Image Processing at the JPL at the JPL	Proceedings of the IEEE Vol. 60 No. 7	117 1972 JUL	8 221-228	[r 16]
50) Fredric J. Harris	Trigonometric Transforms		63 1 - 63		[r 3]
51) Jim Howard	What is good documentation ?	Byte Vol. 7 No. 3	859 1981 MAR	9 132-150	diseño de información (3)
52) B. R. Hunt	Data Structures and Computational Organization in Digital Image Enhancement	Proceedings of the IEEE Vol. 60 No. 7	117 1972 JUL	4 684-687	[r ]
53) Steve A. Hersee Dan Knopoff	An ANSI standard for the C language	Byte Vol. 12 No. 3	859 1986 MAR	7 135-144	portabilidad (2)
54) Thomas S. Huang William Schreiber Gish J. Trahtal	Image Processing	Proceedings of the IEEE Vol. 59 No. 11	117 1971 NOV	12 1586 - 1609	[r 230]
55) IBM de Mexico	Historia de la Computación: el Siglo de) Procesador Electronico	Departamento de Comunicaciones IBM de Mexico S.A.	117		desarrollo historico
56) Jean Jacques Duby	Para mañana que Ordenadores ?	Mundo Cientifico (La Recherche) Vol. 9 No. 87	415 1989 ENE	1 6	editorial: tendencia y limites
57) Luis Jañes Escalad	Analisis de Imagenes		13 177-191		[r 39]
58) C. P. Wong K. P. Shiu	Structured Fast Hartley Transform Algorithms	IEEE Transactions on Acoustics Speech Sig. Proc. Vol. 34 No. 4	119 1986 AUG	3 1000 - 1002	FMT (r 8)
59) David A. Landprete	Analysis Technology for Land Remote Sensing	Proceedings of the IEEE Vol. 69 No. 5	117 1981 MAY	15 628-642	[r 53]
60) Eric J. Lerner	Computers that See	IEEE Spectrum Vol. 17 No. 10	ENE 1980 OCT	6 33 - 33	[r 7]
61) Robert B. Leighton Bruce C. Murray	One Year's Processing and Interpretation AN-87-18	Journal of Geophysical Research Vol. 76 No. 2	174 1971 JAN	4 293-296	[r 6]
62) Richard M. Lord Bennett Ed.	Fast Fourrier for the 6800	Byte Vol. 3 No. 2	859 1979 FEB	9 100-113	[r 5]
63) Bruno Naranda	An Economical Powerful System for Video Enhanced Microscopy	American Laboratory	1987 APR	8 40 - 47	[r ]
64) Maynard Mc Farlane	Digital Pictures Fifty Years Ago	Proceedings of the IEEE Vol. 60 No. 7	117 1972 JUL	3 766-770	[r 10]



BIBLIOGRAFIA				
AUTOR (ES)	ARTICULO	REFERENCIA	PP	NOTAS
65	Fred Molinari	Image Processing on Pc's Data Translation Image Processing Handbook 1988/89 JAN	4 92 - 95	(s)
66	John Molinari	MicroVAX II Image Processing Tutorial Data Translation Image Processing Handbook 1988/89 JAN	6 105-110	(s)
67	George Nagy	Digital Image Processing Activities in Remote Sensing for Earth Resources Proceedings of the IEEE 1977 Vcl. 68 No. 10 OCT	117 1177 - 1200	(r 224)
68	Mark A. O'Neill	Faster than Fast Fourier Byte 1988 Vcl. 13 No. 4 APR	657 6 293-300	FMT (r 8)
69	Robert K. Otnes	An Elementary Design Procedure for Digital Filters IEEE Transactions and Electronic Acoustics Vcl. 22 No. 3 SEP	119 1968 330-335	(r 2)
70	Abrahn Feled	La Proxima Revolucion Informatica Investigacion y Ciencia No.135	267 1987 12 - 22 DIC	(r 2)
71	Walt Penney	Images Byte 1989 Vcl. 14 No. 13 DEC	659 6 248-256	(s)
72	PHOTOgraphic 1990	10 Best 35mm Films PHOTOgraphic 1990 JAN	5 45 - 49	Seleccion de peliculas por sensibilidad, uso y tipo
73	Jose C. Pineda Castillo	Vision por Computadora Ciencia y Desarrollo año XI No. 64 SEP-OCT	719 1985 29 - 38	(r 19)
74	E. Piña Garza	Propiedades de la transformada de Fourier Digital Revista del IMP 1978 Vcl. 2 No. 3 JUL	255 7 65 - 71	(r 8)
75	Tomaso Poggio	Vision by Man and Machine Scientific American 1984 Vcl.250 No. 4 APR	267 11 68 - 78	(r 1)
76	Steven J. Peterson William D. Stanley	Fast Fourier Transforms on your Home Computer Byte 1978 Vcl. 4 No.12 DEC	653 7 14 - 25	(r 4)
77	Gary Radchik	LandSat's Perception poco comun. Asi funciona un sensor remoto Ciencia y Desarrollo 1977 año III No. 15 JUL-AGO	719 21 40 - 62	(s)
78	Leonard E. Ravich	Digital Processing of Vey to Imaging Functions Laser Focus 1987 MAY	5 38 - 34	(r 1)
79	A. Rosenfeld	Image and Picture Processing 6 634-639	6 (r 4)	
80	Jean P. Sansonnet	La Arquitectura de los Nuevos Ordenadores Mundo Cientifico (La Recherche) 1989 Vcl. 9 No.87 ENE	415 10 18 - 19	(s)

## BIBLIOGRAFIA

	AUTOR (ES)	ARTICULO	REFERENCIA	FF	NOTAS	
81	Alberto Sanfeliu	Mision por Computador	Capitulo 17	11 199-205	(r 20)	
82	Robert Saffari	Putting DSP's to Work	Byte Vol. 14 No. 13	853 1297 1297 1297	10 259-272	(s)
83	Kent Sheldon	Probing Space by Camera	Byte Vol. 13 No. 3	853 1287 MAP	5 143-148	(r 21)
84	Richard Singleton	A short Bibliography on the Fast Fourier Transform	IEEE Transactions on Audio Electr. & Acoustics Vol. 17 No. 2	119 1969 JUN	4 166-169	(r 95)
85	Gene Swartz	Sound and Images	Byte Vol. 14 No. 13	853 1297 DEC	3 243-245	(s)
86	Jeffrey L. Star	Introduction to Image Processing	Byte Vol. 11 No. 2	859 1985 FEB	6 163-170	(r 7)
87	Jacques Stern	La Europa de los nuevos ordenadores	Mundo Cientifico (La Recherche) Vol. 9 No. 87	415 1989 ENE	1 7	editorial: proyectos y perspectivas
88	Wayne F. Stevens	Using Data Flow for Application Development	Byte Vol. 11 No. 6	859 1985 JUN	7 267-276	tecnicas de documentacion
89	Theodor Theilheimer	A Matrix Version of the Fast Fourier Transform	IEEE Transactions on Audio Electr. & Acoustics Vol. 17 No. 2	119 1969 JUN	4 158-161	(r 51)
90	Niko Tindenberg	Anatomia de la Vision	Conducta Animal Time Life	8 52 - 53	etapas del proceso visual biologico	
91	Shimon Ullman	Natural Sight and Computerized Vision	Seminar in Vision and Digital Image Processing Mexico City, 21-25 NOV	10 45 - 43	(s)	
92	H. Mitchell Waldrop	Computer Vision	Science Vol. 224 No. 4653	264 1984 JUN 1227	3 - - -	(r 5)
93	Debra S. Williams	Preparing for Ocean Color Imaging	Under Sea Technology Vol. 28 No. 1	289 1987 JAN	3 34 - 36	(r 7)
94	Gregg Williams	Debugging Techniques	Byte Vol. 11 No. 6	859 1985 JUN	8 - - -	tecnicas de programacion
95	Mark Zimmerman	A Beginners's Guide to Spectral Analysis Part 1: Tiny Time Sharing Music	Byte Vol. " No. 2	859 1981 FEB	10 68 - 90	(r 8)
96	Mark Zimmerman	A Beginners's Guide to Spectral Analysis Part 2	Byte Vol. " No. 3	853 1981 MAR	14 166-198	(r 8)

HEREROGRAFIA SUSERIDA

ARTICULO	AUTOR (ES)	REFERENCIA	PP	NOTAS
	Runge, C.	Zeit für Math. and Physik Vol. 46 Vol. 53	1903 1905	433 117 referencia antecedente
Die Grundlagen der mathematischen Wissenschaften	Runge, C. König, H.	Band XI, Vorlesungen über Numerisches Rechnen Vol. 11 Berlin	1924	referencia antecedente
Grundlagen und Methoden der Periodenforschung	Stumpff, K.	Berlin, Julius Springer	1937	referencia antecedente
Tafeln und Aufgaben zur Harmonischen Analyse und Periodogramrechnung	Stumpff, K.	Berlin, Julius Springer	1939	referencia antecedente
Some improvements in Practical Fourier Analysis	Danielson, G. C. Lanczos, C.	Journal Franklin Institute Vol. 233 No.	1942	365-452 referencia antecedente
The Interaction Algorithm and Practical Fourier Analysis	Good, I. J.	Journal of the Royal Statistics Society Vol. E28 No.	1958	361-367 referencia antecedente
Using a Computer to Solve Problems in Physics	Thomas, L. H.	Application of Digital Computers, Massachusetts	1963	referencia antecedente
An Algorithm for the Machine Calculation of the Complex Fourier Series	Cooley, J. W. Tukey, J. W.	Math of Computation Vol. 19 No. 98	1965 AFR	297-301 Publicacion del algoritmo desarrollado en IBM Watson Lab.
Note on the Calculation of Fourier Series	Rudnick, F.	Math of Computation Vol. 20 No.	1966	429-430 Referencia del algoritmo de Cooley & Tukey
Faster Fourier Analysis	Alsop, L. E. Nowroozi, A. A.	Journal of Geophysical Research Vol. 70 No. 22	1966	5482-
What is the Fast Fourier Transform?	Cochran, W. T. Cooley, J. W.	IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics Vol. 15 No. 6	1967 JUR	45 - 55 Implicaciones practicas del uso de FFT
Historical Notes on the Fast Fourier Transform	Cooley, J. W. Welch, P. D. Lewis, P. A. W.	IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics Vol. 15 No. 6	1967 JUN	76 - 79
Application of the FFT to Computation of Fourier Integrals, Series & Convolution Integrals	Cochran, W. T.	IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics Vol. 15 No. 6	1967 JUN	79 - 84
On Computing the Fast Fourier Transform	Singleton, R. C.	Communications of the Association for Computing Machinery Vol. 10 No.10	1967 OCT	647-654
A Fast Fourier Transform Algorithm for Real-Valued Series	Bergland, G. D.	Communications of the Association for Computing Machinery Vol. 11 No.10	1968 OCT	703-710 Version adaptada para aplicacion particular
A Guided Tour of the Fast Fourier Transform	Bergland, G. D.	IEEE Spectrum Vol. 6 No. 7	1969 JUL	41 - 52 Implicaciones practicas del uso de FFT

INFORMACION COMPLEMENTARIA		
CONFERENCIA	POLENTE	INSTITUCION UNIVERSITARIA
LA COMPUTACION Y LA PERCEPCION REMOTA EN LA UNAP	ROMAN ALVAREZ	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATEMATICAS APLICADAS Y SISTEMAS
PROCESAMIENTO DE INFORMACION AL ESTILO DE LAS REDONJAS VISUALES PRIMARIAS	EUSEBIO MARTINEZ OPIELOS	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOMEDICAS
ANALISIS DE IMAGENES VISUALES	JOSÉ RAÚL WAZUL	INSTITUTO DE ASTRONOMIA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO IN ANEXO DE LA COMPUTACION EN MEXICO COMISIÓN ASADOL, PRESENTE Y FUTURO DE LA COMPUTACION EN MEXICO	
TEMA	PROCESAMIENTO DE IMAGENES Y VISION
MODERADORA	ROMAN ALVAREZ
FECHA	JUNIO 8, 1988

# FILTRO DIGITAL EN EL PROCESO DE IMAGENES

## INTRODUCCION

I	II	III	IV
FUNDAMENTOS DE IMAGENES DIGITALES	TRANSFORMACION MATEMATICA DE IMAGENES	FILTRO DIGITAL PARA PROCESO DE IMAGENES	APLICACIONES
1.1 Desarrollo del Proceso Digital de Imágenes	II.1 Introducción a la Transformada de Fourier	III.1 Filtros en el Dominio de Frecuencia Espectral	IV.1 Criterios de Sistemización
1.2 Formación de Imágenes y el Sentido Visual	II.2 Transformada Discreta de Fourier	III.2 Filtros Pasa Baja	IV.2 Imágenes Prototipo
1.3 Elementos del Sistema de Proceso Digital de Imágenes	II.3 Transformada Discreta Bidimensional de Fourier	III.3 Filtros Pasa Alta	IV.3 Registros Geofísicos
1.4 Modelo de Imagen Digital	II.4 Propiedades de la Transformada Discreta de Fourier	III.4 Evaluación y Análisis Espectral	IV.4 Imágenes Landsat IV
1.5 Muestreo y Cuantificación Uniforme	II.5 Transformada Rápida de Fourier	III.5 Filtros en el Dominio Espacial	
Conclusion I	Conclusion II	Conclusion III	Conclusion IV
{1-30}	{31-70}	{71-96}	{97-114}

**APENDICES**  
**INFORMACION COMPLEMENTARIA**

**INTRODUCCION**

A RUTINAS PARA PROCESO DIGITAL DE IMAGENES	B TARJETA DIGITALIZADORA DE VIDEO	C APLICACIONES DEL PROCESO DE IMAGENES	D GLOSARIO	E BIBLIOGRAFIA
- CODIGO FUENTE	- IMP 256.236.6	- CASOS CARACTERISTICOS	- VOCABULARIO	- LIEP33 - ARTICULOS
<ul style="list-style-type: none"> <li>. declaracion de librerias, constantes, estructuras, variables globales, nucleos de convolucion espacial y prototipos</li> <li>. definicion de rutinas para proceso digital de imagenes</li> <li>. esquema funcional</li> <li>. histograma de desarrollo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. características, descripción.</li> <li>. sincronizacion de video.</li> <li>. banco de memoria, emision de video, recepcion de video.</li> <li>. especificaciones ambientales, electricas, de cableado y conectores</li> <li>. sistema de captacion visual</li> <li>. convertidor analogico digital</li> <li>. muestreo, cuantificacion y encodificacion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. reseña</li> <li>. caso 1. Titanic proceso de imagenes en vehiculos remotamente operados</li> <li>. caso 2. Arte. Conservacion, Restauracion y Catalogo</li> <li>. caso 3. vision robotica, aplicacion de proceso digital en tiempo real</li> <li>. tendencia actual en investigacion y desarrollo tecnologico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. definicion de los terminos mas comunes en el vocabulario de proceso digital de imagenes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. informacion bibliografica de las obras consultadas por autor, titulo y clasificacion</li> <li>. informacion hemerografica de los articulos consultados por articulo, autores, referencia, paginas y notas</li> <li>. articulos clasicos</li> <li>. conferencias presenciadas</li> </ul>
[115-172]	[173-180]	[181-188]	[189-206]	[207-216]